



**SIMULADOR DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS UTILIZANDO
FASORES DINÂMICOS PARA ANÁLISE NÃO-LINEAR DE REDES ELÉTRICAS
COM EQUIPAMENTOS FACTS**

Luciano de Oliveira Daniel

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

**Orientadores: Edson Hirokazu Watanabe
Sergio Gomes Junior**

Rio de Janeiro

Junho de 2018

SIMULADOR DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS UTILIZANDO
FASORES DINÂMICOS PARA ANÁLISE NÃO-LINEAR DE REDES
ELÉTRICAS COM EQUIPAMENTOS FACTS

Luciano de Oliveira Daniel

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:



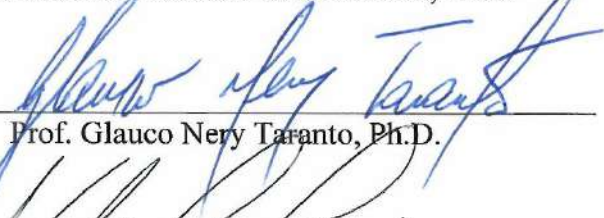
Prof. Edson Hirokazu Watanabe, D.Eng.



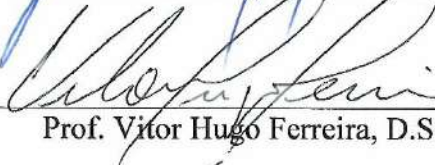
Prof. Sergio Gomes Junior, D.Sc.



Prof. Robson Francisco da Silva Dias, D.Sc.



Prof. Glauco Nery Taranto, Ph.D.



Prof. Vitor Hugo Ferreira, D.Sc.



Profª. Maria Cristina Dias Tavares, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2018

Daniel, Luciano de Oliveira

Simulador de Transitórios Eletromagnéticos Utilizando Fasores Dinâmicos para Análise Não-Linear de Redes Elétricas com Equipamentos FACTS/Luciano de Oliveira Daniel. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XX, 183 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Edson Hirokazu Watanabe

Sergio Gomes Júnior

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 151-160.

1. Fasores Dinâmicos. 2. Transitórios Eletromagnéticos. 3. FACTS. I. Watanabe, Edson Hirokazu *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Esta tese é dedicada ao meu avô João Daniel (*in memoriam*).

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, o criador de todas as ciências e detentor de infinita sabedoria, por me sustentar e por bondosamente me propiciar saúde e condições para chegar até aqui.

Meus agradecimentos ao Prof. Edson Watanabe e ao Prof. Sergio Gomes pela orientação, ao CEPEL pelo apoio e aos colegas Sergio Varricchio e Thiago Masseran pelas discussões técnicas.

Agradeço de maneira especial à minha amada esposa Graziane por sua companhia, apoio, orações, compreensão, carinho e por tornar mais leve minha árdua caminhada. Aos meus pais Fernando e Lúcia e ao meu irmão Leandro que sempre me incentivaram e torceram por mim.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

SIMULADOR DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS UTILIZANDO
FASORES DINÂMICOS PARA ANÁLISE NÃO-LINEAR DE REDES ELÉTRICAS
COM EQUIPAMENTOS FACTS

Luciano de Oliveira Daniel

Junho / 2018

Orientadores: Edson Hirokazu Watanabe
Sergio Gomes Júnior

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho propõe uma nova metodologia de modelagem computacional para simulação no domínio do tempo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência com foco na avaliação do desempenho dinâmico de elementos não-lineares como, por exemplo, equipamentos FACTS chaveados a tiristores. A metodologia proposta consiste na aplicação do método trapezoidal aos elementos da rede modelados como fasores dinâmicos resultando em modelos de acompanhamento. No caso dos elementos chaveados, obtém-se modelos de acompanhamento linearizados que podem ser resolvidos pelo método de Newton em conjunto com a solução da rede elétrica. Uma das vantagens desta nova metodologia está na possibilidade de integração da ferramenta de simulação no domínio do tempo com métodos de análise linear para ajuste coordenado dos sistemas de controle associados. Também é possível a análise sistemática de múltiplas condições operativas, obtidas de programas de fluxo de potência, pela capacidade de inicialização dos modelos baseados em fasores dinâmicos. As implementações computacionais foram realizadas no Programa MATLAB e os resultados comparados com simulações no Programa PSCAD/EMTDC, dando ênfase nos reatores controlados a tiristor (TCR).

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

ELECTROMAGNETIC TRANSIENT SIMULATOR USING
DYNAMIC PHASORS FOR NON-LINEAR ANALYSIS OF ELECTRICAL
NETWORKS WITH FACTS EQUIPMENT

Luciano de Oliveira Daniel

June / 2018

Advisors: Edson Hirokazu Watanabe
Sergio Gomes Júnior

Department: Electrical Engineering

This work proposes a new computer modelling methodology for time domain electromagnetic transient simulations in power systems, where the focus is the dynamic performance analysis of FACTS equipment. The proposed methodology consists in applying the trapezoidal method to network elements modelled with dynamic phasors resulting in companion models. For FACTS equipment models, a linearized companion model is obtained and solved together with the electrical network equations by Newton method. One of the advantages of this new methodology is the integrated time domain simulation and linear analysis for coordinated controller tuning of FACTS equipment. The systematic analysis of multiple operating conditions, obtained from power flow programs, is also possible due to the initialization ability of the dynamic phasor models. The computational implementations were carried out in MATLAB and the results compared with simulations in the PSCAD/EMTDC program focusing in the thyristor-controlled reactors.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS.....	XV
NOMENCLATURA.....	XVI
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
1.2 MOTIVAÇÃO.....	5
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	6
1.4 METODOLOGIA	7
1.5 CONTRIBUIÇÕES DA TESE	8
1.6 APLICAÇÕES.....	9
1.7 ESTRUTURA DA TESE	10
CAPÍTULO 2 CONCEITO DE FASORES DINÂMICOS E GRANDEZAS TENSORIAIS	12
2.1 DEFINIÇÃO BÁSICA DE FASORES DINÂMICOS	12
2.2 CONCEITO DE TENSORES APLICADO A SISTEMAS DE POTÊNCIA	16
2.3 MODELAGEM DE TRANSITÓRIOS ELETROMECÂNICOS	21
2.3.1 MODELAGEM DE REDE NA SIMULAÇÃO DE TRANSITÓRIOS ELETROMECÂNICOS	21
2.3.2 MODELAGEM DE EQUIPAMENTOS FACTS E ELOS HVDC	23
2.4 CIRCUITO RLC MODELADO POR FASORES DINÂMICOS.....	24
2.5 SIMULAÇÃO DE RLC MODELADO POR FASORES DINÂMICOS	27
CAPÍTULO 3 MODELOS DE ACOMPANHAMENTO DE FASORES DINÂMICOS	31
3.1 INTRODUÇÃO.....	31
3.2 EQUAÇÕES PARA RESISTÊNCIA	33
3.3 EQUAÇÕES PARA INDUTÂNCIA	35
3.4 EQUAÇÕES PARA CAPACITÂNCIA	39
3.5 EQUAÇÕES PARA LINHA DE TRANSMISSÃO SEM PERDAS	42
3.6 MODELO APROXIMADO PARA LINHA DE TRANSMISSÃO COM PERDAS	47
3.7 CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES SOBRE O MAFD	48
CAPÍTULO 4 SIMULAÇÃO DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS COM FASORES DINÂMICOS (DPTS)	53
4.1 FORMULAÇÃO PARA CÁLCULO DE TRANSITÓRIOS POR ANÁLISE NODAL.....	53
4.2 ALGORITMO DO DPTS NO MATLAB.....	56
4.3 SIMULAÇÕES E VALIDAÇÃO DO PRIMEIRO PROTÓTIPO DPTS	60
CAPÍTULO 5 SIMULAÇÃO POR FD INCLUINDO ELEMENTOS NÃO-LINEARES	64

5.1	INICIALIZAÇÃO NO DPTS (REGIME PERMANENTE)	64
5.2	MODELAGEM DE ELEMENTOS NÃO-LINEARES	72
5.3	EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MLA	76
5.4	DPTS INCLUINDO INDUTOR TRATADO COMO TRC COM SOLUÇÃO PELO MÉTODO ALTERNADO.....	82
5.4.1	MÉTODO ALTERNADO SEM MLA	82
5.4.2	MÉTODO ALTERNADO COM MLA.....	88
5.5	DPTS INCLUINDO SVC COM SOLUÇÃO PELO MÉTODO ALTERNADO.....	94
5.5.1	MÉTODO ALTERNADO SEM MLA	94
5.5.2	MÉTODO ALTERNADO COM MLA.....	102
5.6	DPTS INCLUINDO MÚLTIPLOS SVCs	106
5.7	DPTS CONSIDERANDO HARMÔNICOS DO TCR.....	112
5.8	DPTS CONSIDERANDO HARMÔNICOS NA REDE	116
5.9	DPTS CONSIDERANDO REDE TRIFÁSICA	121
CAPÍTULO 6 ANÁLISE LINEAR INTEGRADA COM DPTS INCLUINDO SVC		133
6.1	MODELAGEM LINEARIZADA DA REDE CONTENDO SVC	133
6.2	ANÁLISE LINEAR DE SISTEMA TESTE DE 4 BARRAS CONTENDO UM SVC	135
CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....		148
7.1	CONCLUSÕES.....	148
7.2	TRABALHOS FUTUROS	149
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		151
APÊNDICE A EQUAÇÕES DA MODELAGEM DO TCR BASEADA EM FASORES DINÂMICOS.....		161
APÊNDICE B SISTEMAS TESTE		166

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Circuito com fonte cossenoidal e indutor.....	16
Figura 2.2 – Fasores de amplitude unitária no plano complexo.	17
Figura 2.3 – Fasores (ou vetores) girantes da corrente no plano complexo.	17
Figura 2.4 – Circuito com fonte cossenoidal e elemento não-linear.	20
Figura 2.5 - Circuito RLC de exemplo.	24
Figura 2.6 - Corrente i e seus FDs no circuito RLC simulado no MATLAB.	28
Figura 2.7 - RLC série e uma fonte de tensão ideal no PSCAD.	29
Figura 2.8 – Tensão da fonte ideal do circuito RLC simulado no PSCAD.	29
Figura 2.9 – Tensão no capacitor do circuito RLC simulado no PSCAD.	29
Figura 2.10 – Corrente no indutor do circuito RLC simulado no PSCAD.	30
Figura 2.11 – Corrente no indutor – Comparação MATLAB e PSCAD.	30
 Figura 3.1 - Área do trapézio na aproximação da integral.....	31
Figura 3.2 – Resistência entre dois nós genéricos k e m	33
Figura 3.3 – Circuito equivalente de FDs da resistência.	34
Figura 3.4 - Indutância entre dois nós genéricos k e m	35
Figura 3.5 - Circuito equivalente da indutância.	39
Figura 3.6 - Capacitância entre dois nós genéricos k e m	39
Figura 3.7 - Circuito equivalente da capacitância.	42
Figura 3.8 – Linha de transmissão sem perdas entre dois nós genéricos k e m	43
Figura 3.9 – Circuito equivalente da LT sem perdas (parte real).....	47
Figura 3.10 - Circuito equivalente da LT sem perdas (parte imaginária).....	47
Figura 3.11 – Modelo aproximado para LT com perdas.	48
Figura 3.12 – Modelo de Acompanhamento.....	51
 Figura 4.1 – Nó k genérico de uma rede descrita por fasores dinâmicos.	53
Figura 4.2 – Fluxograma básico do DPTS implementado no MATLAB.....	57
Figura 4.3 – Modelo do Sistema Teste 1a no PSCAD.	60
Figura 4.4 - Modelo do Sistema Teste 1a no DPTS.....	61
Figura 4.5 – Comparação DPTS e PSCAD no Sistema Teste 1a – Tensão na barra 9.	61
Figura 4.6 – Modelo do Sistema Teste 2a no PSCAD.	61
Figura 4.7 - Modelo do Sistema Teste 2a no MATLAB.	62
Figura 4.8 - Comparação DPTS e PSCAD no Sistema Teste 2a – Tensão na barra 10.	62
Figura 4.9 - Modelo do Sistema Teste 2b no PSCAD.....	62
Figura 4.10 - Modelo do Sistema Teste 2b no MATLAB.	63
Figura 4.11 - Comparação DPTS e PSCAD no Sistema Teste 2b – Tensão na barra 10.....	63

Figura 5.1 – Inicialização da tensão RMS do TCR.....	70
Figura 5.2 – Inicialização do ângulo de disparo do TCR.	70
Figura 5.3 – Inicialização da Corrente da fonte (fase a).....	71
Figura 5.4 – Inicialização da susceptância do TCR.	71
Figura 5.5 – Elemento não-linear <i>shunt</i> ou série conectado à rede.....	72
Figura 5.6 – MLA para um elemento não-linear.....	75
Figura 5.7 – MLA de cada frequência para um elemento não-linear.....	75
Figura 5.8 – Circuito com resistor não-linear.	76
Figura 5.9 – Solução gráfica do circuito com resistor não-linear.	77
Figura 5.10 – MLA para o resistor não-linear.	80
Figura 5.11 – Indutor inserido no DPTS no lugar do TCR.....	84
Figura 5.12 – Sistema Teste 3a representado no DPTS – Indutor no lugar do TCR.	85
Figura 5.13 – Sistema Teste 3a representado no PSCAD.	86
Figura 5.14 – Comparação MATLAB e PSCAD da tensão na barra 1.	86
Figura 5.15 – Comparação DPTS e PSCAD da tensão na barra 2.....	87
Figura 5.16 – Comparação DPTS e PSCAD da tensão na barra 3.....	87
Figura 5.17 – Comparação DPTS e PSCAD da corrente na fonte.....	87
Figura 5.18 – Comparação DPTS e PSCAD da corrente no capacitor.	88
Figura 5.19 – Comparação DPTS e PSCAD da corrente do indutor (inserido no lugar do TCR).....	88
Figura 5.20 – Comparação DPTS e PSCAD da tensão na barra 3.....	92
Figura 5.21 – Comparação DPTS e PSCAD da corrente no capacitor.	92
Figura 5.22 – Comparação DPTS e PSCAD da corrente no indutor fixo inserido.	93
Figura 5.23 – Característica dinâmica I-V da resposta do indutor fixo.....	93
Figura 5.24 – Sistema Teste 3b no DPTS (MATLAB).	100
Figura 5.25 – Sistema Teste 3b no PSCAD.....	100
Figura 5.26 – Comparação da tensão RMS (filtrada) do TCR.	101
Figura 5.27 – Comparação do ângulo de disparo do TCR.....	101
Figura 5.28 – Comparação da corrente instantânea na fase “a” da fonte.	101
Figura 5.29 – Degrau -1% / +1% - Comparação da tensão RMS (filtrada) do TCR.	103
Figura 5.30 – Degrau -1% / +1% - Comparação do ângulo de disparo do TCR.	104
Figura 5.31 – Chaveamento - Comparação da tensão RMS (filtrada) do TCR.	104
Figura 5.32 – Chaveamento - Comparação do ângulo de disparo do TCR.	105
Figura 5.33 – Chaveamento - Comparação da corrente instantânea na fase “a” da fonte.....	105
Figura 5.34 – Sistema Teste 5a no MATLAB.	106
Figura 5.35 – Sistema Teste 5a no PSCAD.....	107
Figura 5.36 – Tensão RMS dos TCRs 1, 2 e 3.....	107
Figura 5.37 – Ângulos de disparo dos TCRs 1, 2 e 3.....	107
Figura 5.38 – Sistema Teste 4a no DPTS.....	108
Figura 5.39 – Sistema Teste 4a no PSCAD.....	108

Figura 5.40 – Comparação do DPTS com PSCAD: tensões RMS dos SVCs 1 e 2.....	109
Figura 5.41 – Comparação do DPTS com PSCAD: ângulos de disparo dos SVCs 1 e 2.	109
Figura 5.42 – Correntes $i_{crab}(t)$ dos SVCs 1 e 2 no DPTS.....	110
Figura 5.43 – Correntes $i_{crab}(t)$ dos SVCs 1 e 2.....	110
Figura 5.44 – Correntes $i_a(t)$ dos SVCs 1 e 2 no DPTS.....	111
Figura 5.45 – Ângulo de disparo do SVC 2 para diferentes passos de integração no DPTS.	111
Figura 5.46 – Convenção de correntes do modelo SVC no DPTS.	112
Figura 5.47 – Fasores dinâmicos (real e imaginário) da tensão fase-fase do TCR.	112
Figura 5.48 – Correntes trifásicas do TCR simulado no DPTS.	113
Figura 5.49 – Correntes trifásicas do SVC simulado no DPTS.	113
Figura 5.50 – Comparação da tensão RMS do SVC.	114
Figura 5.51 – Comparação do ângulo de disparo do SVC.....	114
Figura 5.52 – Comparação da corrente na fase a da fonte do sistema.....	114
Figura 5.53 – Comparação da corrente i_{ab} no ramo do TCR.	115
Figura 5.54 – Comparação da corrente i_{cra} do TCR.	115
Figura 5.55 – Comparação da corrente i_{cra} do TCR (zoom detalhando harmônicos).	115
Figura 5.56 – Comparação DPTS (sem harmônicos na rede) e PSCAD: tensão RMS.....	116
Figura 5.57 – Comparação DPTS (sem harmônicos na rede) e PSCAD: ângulo Alfa.	117
Figura 5.58 – Comparação DPTS (sem harmônicos na rede) e PSCAD: corrente $i_a(t)$	117
Figura 5.59 – Comparação DPTS (sem harmônicos na rede) e PSCAD: corrente $i_{cra}(t)$	117
Figura 5.60 – Comparação DPTS (sem harmônicos na rede) e PSCAD: corrente $i_{crab}(t)$	118
Figura 5.61 – Comparação DPTS (com harmônicos na rede) e PSCAD: tensão RMS.	118
Figura 5.62 – Comparação DPTS (com harmônicos na rede) e PSCAD: ângulo Alfa.	119
Figura 5.63 – Comparação DPTS (com harmônicos na rede) e PSCAD: corrente $i_a(t)$	119
Figura 5.64 – Comparação DPTS (com harmônicos na rede) e PSCAD: corrente $i_{crab}(t)$	119
Figura 5.65 – Comparação DPTS (com harmônicos na rede) e PSCAD: corrente $i_{cra}(t)$	120
Figura 5.66 – Comparação da Corrente $i_a(t)$ no DPTS com e sem harmônicos na rede.	120
Figura 5.67 – Sistema Teste 3c no DPTS.	121
Figura 5.68 – Sistema Teste 3c no PSCAD.	121
Figura 5.69 – Degrau de -10% em V_{ref} : tensão RMS do SVC.....	122
Figura 5.70 – Degrau de -10% em V_{ref} : ângulo de disparo do SVC.	122
Figura 5.71 – Degrau de -10% em V_{ref} : corrente $i_a(t)$ do SVC.....	123
Figura 5.72 – Degrau de -10% em V_{ref} : corrente $i_{cra}(t)$ do SVC.	123
Figura 5.73 – Degrau de -10% em V_{ref} : corrente $i_{crab}(t)$ do SVC.....	123
Figura 5.74 – Degrau de -10% em V_{ref} : tensão RMS do SVC.....	124
Figura 5.75 – Degrau de -10% em V_{ref} : ângulo de disparo do SVC.	124
Figura 5.76 – Degrau de -10% em V_{ref} : corrente $i_a(t)$ do SVC.....	124
Figura 5.77 – Degrau de -10% em V_{ref} : corrente $i_{cra}(t)$ do SVC.	125
Figura 5.78 – Degrau de -10% em V_{ref} : corrente $i_{crab}(t)$ do SVC.....	125

Figura 5.79 – Degrau de +10% em V_{ref} : tensão RMS do SVC.....	126
Figura 5.80 – Degrau de +10% em V_{ref} : susceptância $B_{lcr}(t)$ do SVC.	126
Figura 5.81 – Degrau de +10% em V_{ref} : susceptância $B_n(t)$ do SVC.....	126
Figura 5.82 – Degrau de +10% em V_{ref} : ângulo de disparo do SVC.	127
Figura 5.83 – Degrau de +10% em V_{ref} : ângulo de referência do PLL do SVC.....	127
Figura 5.84 – Degrau de +10% em V_{ref} : ângulo de condução do SVC.....	127
Figura 5.85 – Degrau de +10% em V_{ref} : correntes $i_{lcrab}(t)$, $i_{lcrbc}(t)$ e $i_{lcrca}(t)$ do SVC.	128
Figura 5.86 – Degrau de +10% em V_{ref} : correntes $i_{lcrab}(t)$, $i_{lcrbc}(t)$ e $i_{lcrca}(t)$ do SVC.....	128
Figura 5.87 – Degrau de +10% em V_{ref} : correntes $i_a(t)$, $i_b(t)$ e $i_c(t)$ do SVC.	128
Figura 5.88 – Chaveamento de carga RL na fase “a”: tensões RMS dos SVCs.....	129
Figura 5.89 – Chaveamento de carga RL na fase “a”: susceptâncias B_{lcr} dos SVCs.	129
Figura 5.90 – Chaveamento de carga RL na fase “a”: susceptâncias B_n dos SVCs.....	130
Figura 5.91 – Chaveamento de carga RL na fase “a”: ângulo de disparo dos SVCs.....	130
Figura 5.92 – Chaveamento de carga RL na fase “a”: âng. de ref. dos PLLs dos SVCs.	130
Figura 5.93 – Chaveamento de carga RL na fase “a”: ângulo de condução dos SVCs.....	131
Figura 5.94 – Chaveamento de carga RL na fase “a”: correntes $i_{lcrab}(t)$, $i_{lcrbc}(t)$ e $i_{lcrca}(t)$	131
Figura 5.95 – Chaveamento de carga RL na fase “a”: correntes $i_{lcrab}(t)$, $i_{lcrbc}(t)$ e $i_{lcrca}(t)$	131
Figura 5.96 – Chaveamento de carga RL na fase “a”: correntes $i_a(t)$, $i_b(t)$ e $i_c(t)$	132
 Figura 6.1 – Origem estrutural matemática dos métodos DPTS e DPLM.	135
Figura 6.2 – Sistema Teste 2c.....	135
Figura 6.3 – Ponto de operação (regime permanente) do Sistema Teste 2c.....	136
Figura 6.4 – Malha de controle de tensão do SVC implementada no ANATEM.....	136
Figura 6.5 – Simulação no ANATEM de resposta a um degrau de 0,1% em V_{ref}	137
Figura 6.6 – Sistema Teste 2c no PSCAD (rede).....	137
Figura 6.7 – Sistema Teste 2c no PSCAD (SVC).....	138
Figura 6.8 – Sistema Teste 2c no PSCAD (controle).....	138
Figura 6.9 – Tentativa de criação de <i>snapshot</i> no PSCAD para Sistema Teste 2c.....	139
Figura 6.10 – Modelo de PLL utilizado na modelagem DPLM.	140
Figura 6.11 – Polos dominantes do Sistema Teste 2c linearizado.	141
Figura 6.12 – Gráfico ampliado próximo aos polos instáveis do Sistema Teste 2c.....	141
Figura 6.13 – Resposta em frequência do Sistema Teste 2c linearizado.....	142
Figura 6.14 – Desvio da tensão do SVC para degrau de 0,1% em V_{ref} (Sistema Teste 2c linearizado)....	143
Figura 6.15 – Comparação das respostas do ANATEM e do DPLM para o Sistema Teste 2c.....	143
Figura 6.16 – Lugar-das-raízes variando-se o ganho K_{P-PI} no Sistema Teste 2c.	144
Figura 6.17 – Resposta em frequência do sistema reduzido com $K_{P-PI}=1$	145
Figura 6.18 – Desvio da tensão do SVC (com $K_{P-PI}=1$) para degrau de 0,1% em V_{ref}	145
Figura 6.19 – Sistema Teste 2c no DPTS.....	146
Figura 6.20 – Comparação entre DPTS e PSCAD para chaveamento de carga – Tensão do SVC.....	146

Figura 6.21 – Comparação entre DPTS e PSCAD para chaveamento de carga – Ângulo Alfa do SVC.. 147

Figura A.1 – Reator controlado por tiristores em paralelo com capacitor.....	161
Figura A.2 – Função de chaveamento.	162
Figura A.3 – Malha de controle de tensão do SVC.....	165
Figura A.4 – Malha do PLL.....	165
Figura A.5 – Modelo simplificado do PLL.....	165
Figura B.1 – Diagrama do Sistema Teste 1a.....	168
Figura B.2 - Diagrama do Sistema Teste 2a.	169
Figura B.3 - Diagrama do Sistema Teste 2b.	170
Figura B.4- Diagrama do Sistema Teste 2c.	171
Figura B.5 - Diagrama do Sistema Teste 3a.	173
Figura B.6 - Diagrama do Sistema Teste 3b.	174
Figura B.7 - Diagrama do Sistema Teste 3c.	175
Figura B.8 - Diagrama do Sistema Teste 3d.....	177
Figura B.9 - Diagrama do Sistema Teste 4a.	178
Figura B.10- Diagrama do Sistema Teste 5a.	182

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Valores dos parâmetros e dados para simulação do RLC.....	27
Tabela 5.1 – Resultado da inicialização do TCR e da rede.	69
Tabela 5.2 – Resultado das iterações para a solução simultânea.	79
Tabela 5.3 – Resultado das iterações para a solução alternada.....	80
Tabela 5.4 – Resultado das iterações para a solução alternada com MLA.....	81
Tabela 5.5 – Comparativo entre os três métodos de solução.....	81
Tabela 6.1 – Lista de polos dominantes do Sistema Teste 2c linearizado.....	141
Tabela 6.2 – Lista de polos dominantes do Sistema Teste 2c com $K_{p,pl}=1$	144
Tabela B.1 – Formato do arquivo de dados do DPTS.....	166
Tabela B.2 – Arquivo de dados do Sistema Teste 1a.....	168
Tabela B.3 - Arquivo de dados do Sistema Teste 2a.....	169
Tabela B.4 - Arquivo de dados do Sistema Teste 2b.....	170
Tabela B.5 - Arquivo de dados do Sistema Teste 2c.....	171
Tabela B.6 - Arquivo de dados do Sistema Teste 3a.....	173
Tabela B.7 - Arquivo de dados do Sistema Teste 3b.....	174
Tabela B.8 - Arquivo de dados do Sistema Teste 3c.....	175
Tabela B.9 - Arquivo de dados do Sistema Teste 3d.....	177
Tabela B.10 – Ponto de operação (fluxo de potência) do Sistema Teste 4a.....	179
Tabela B.11 - Arquivo de dados do Sistema Teste 4a.....	179
Tabela B.12 - Arquivo de dados do Sistema Teste 5a.....	182

Nomenclatura

Siglas e abreviações:

CEPEL	- Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
ONS	- Operador Nacional do Sistema Elétrico
EPE	- Empresa de Pesquisa Energética
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
SIN	- Sistema Interligado Nacional (sistema elétrico brasileiro)
CSC	- <i>Current Source Converter</i> (conversor tipo fonte de corrente)
VSC	- <i>Voltage Source Converter</i> (conversor tipo fonte de tensão)
MMC	- <i>Modular Multilevel Converter</i> (conversor multinível modular)
EMTP	- <i>Electromagnetic Transients Program</i> (programa para simulação de transitórios eletromagnéticos)
DPTS	- <i>Dynamic Phasors Transient Simulation</i> (simulação de transitórios utilizando fasores dinâmicos)
DPLM	- <i>Dynamic Phasors Linear Modelling</i> (modelagem linearizada baseada em fasores dinâmicos)
ATP	- <i>Alternative Transient Program</i> (programa para simulação de transitórios eletromagnéticos alternativo)
FACTS	- <i>Flexible AC Transmission Systems</i> (Sistemas de Transmissão em Corrente Alternada flexíveis)
PACDYN	- Programa do CEPEL para análise de estabilidade para pequenas perturbações (análise linear)
ANATEM	- Programa do CEPEL para análise de estabilidade eletromecânica
PSS/E	- <i>Power System Simulation for Engineers</i> (programa para simulação de transitórios eletromecânicos)
PSCAD	- <i>Power Systems Computer Aided Design</i> (programa auxiliar para projeto de sistemas de potência)
EMTDC	- <i>Electromagnetic Transients with DC Analysis</i> (Transitórios Eletromagnéticos com Análise de Corrente Contínua)
SVC	- <i>Static var Compensator</i> (compensador estático de reativo). Equipamento composto de um TCR em paralelo com um capacitor fixo ou chaveado.

TCR	- <i>Thyristor-Controlled Reactor</i> (reator controlado a tiristores)
TCSC	- <i>Thyristor-Controlled Series Capacitor</i> (capacitor série controlado a tiristores)
GCSC	- <i>Gate Controlled Series Capacitor</i> (capacitor série controlado)
SSSC	- <i>Static Synchronous Series Compensator</i> (compensador série síncrono estático)
UPFC	- <i>Unified Power Flow Controller</i> (controlador de fluxo de potência unificado)
UPQC	- <i>Unified Power Quality Conditioner</i> (condicionador de qualidade de energia unificado)
UPLC	- <i>Unified Active Power Line Conditioner</i> (condicionador de linha de potência ativa unificado)
PLL	- <i>Phase Locked Loop</i> (detector de fase da sequência positiva)
PWM	- <i>Pulse Width Modulation</i> (modulação por largura de pulso)
BPA	- <i>Bonneville Power Administration</i>
p.u.	- Por unidade (grandeza normalizada por um valor base)
FD	- Fasores dinâmicos
MLA	- Modelo Linearizado de Acompanhamento
LT	- Linha de Transmissão
SDPA	- <i>Sequential Dominant Pole Algorithm</i> (Algoritmo de Polo Dominante Sequencial)
SMDPA	- <i>Sequential MIMO Dominant Pole Algorithm</i> (Algoritmo de Polo Dominante Sequencial para Funções de Transferência MIMO)
MOR	- Modelo de Ordem Reduzida
MIMO	- <i>Multi-Input Multi-Output</i> (Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas)
SISO	- <i>Single-Input Single-Output</i> (Mono Entrada e Mono Saída)
DVR	- <i>Dynamic Voltage Restorer</i> (restauradores dinâmicos de tensão)
DFIG	- <i>Double-Feed Induction Generator</i> (gerador de indução duplamente alimentado)
MAFD	- Modelo de Acompanhamento de Fasores Dinâmicos

Notações:

v, i	- Minúsculas em itálico são usadas para destacar índices e variáveis no texto e evitar confusão.
$\delta, \lambda, \omega, \phi$	- Letras gregas em geral não são itálicas.
\tilde{V}	- Maiúsculas encimadas por “~” em itálico representam fasores dinâmicos (grandeza complexa variável no tempo).
I	- Matriz identidade.
0	- Matriz ou vetor nulo.
Z	- Maiúsculas em negrito representam matrizes.
v	- Minúsculas em negrito representam vetores.
$\mathbf{Z}^t, \mathbf{v}^t$	- Sobrescrito “t” indica matriz ou vetor transposto.
\mathbf{X}^{-1}, f^{-1}	- Sobrescrito “-1” indica matriz ou função inversa.
$V_{\text{Re}}, V_{\text{Im}}$	- Subscritos “Re” e “Im” indicam respectivamente componentes real e imaginária do fasor dinâmico (funções do tempo).
$V^{\text{Re}}, V^{\text{Im}}$	- Sobrescritos “Re” e “Im” também indicam respectivamente componentes real e imaginária do fasor dinâmico.
$I'_{\text{Re}}, I'_{\text{Im}}$	- Fasores dinâmicos com sobrescrito “'” representam termo histórico do modelo de acompanhamento.
$\tilde{\mathbf{v}}$	- Minúsculas em negrito encimadas por “~” representam vetores de componentes de fasores dinâmicos.
\dot{V}	- Maiúsculas encimadas por “.” em itálico representam fasores.
$\dot{v}, \dot{\theta}$	- Variáveis encimadas por “.” representam derivada desta variável em relação ao tempo.
$\frac{dy}{dx}$	- Derivada total da variável y em relação à variável x.
$\frac{\partial y}{\partial x}$	- Derivada parcial da variável y em relação à variável x.
$f(x)$	- Função f de variável x.
$X(s)$	- Transformada de Laplace da função do tempo $x(t)$.
$ x $	- Módulo ou valor absoluto da variável x.
$\arg\{Z\}$	- ângulo do número complexo Z.

- $\mathcal{L}\{\tilde{I}(t)\}$ - Transformada de Laplace do fasor dinâmico $\tilde{I}(t)$.
- $\mathcal{L}^{-1}\{\tilde{I}(t)\}$ - Transformada inversa de Laplace do fasor dinâmico $\tilde{I}(t)$.
- \Re - Parte real de um número ou função complexa.
- \Im - Parte imaginária de um número ou função complexa.
- $\sum_{i=0}^n V_i$ - Somatório de elementos V_i com i variando de zero até n .
- $v(t)^{(i+1)}$ - Sobrescrito $(i+1)$ representa o valor de $v(t)$ na próxima iteração.
- $v(t)^{(i)}$ - Sobrescrito (i) representa o valor de $v(t)$ na iteração atual.
- $\mathbf{di}(t)$ - Vetor diferencial de corrente em função do tempo.

Símbolos gerais:

C - capacitância

L - indutância

R - resistência

Z - impedância

G - condutância

B - susceptância

f - frequência

T - período

v - tensão

i - corrente

j - número imaginário puro ($\sqrt{-1}$)

t - tempo

ω - velocidade angular

Δt - passo de integração

π - constante Pi (3,141592653589793)

e - número de Euler (2,718281828459045)

τ - tempo de trânsito de LT

η - número de identificação de chave

λ - autovalor

Δ - variação ou desvio

Ω - unidade Ohm

S - unidade Siemens

Capítulo 1

Introdução

As análises de transitórios em sistemas de potência modernos, que contém uma penetração cada vez maior de elementos não-lineares baseados em eletrônica de potência, têm trazido alguns desafios em relação à grande complexidade das interações dinâmicas que surgem em uma ampla faixa de frequência.

No caso das dinâmicas de baixa frequência, envolvendo principalmente os transitórios eletromecânicos e a interação da dinâmica mais lenta (da ordem de até 5 Hz) dos equipamentos e sistemas de controle, é possível utilizar programas de estabilidade transitória. Tais simuladores permitem a modelagem da rede elétrica completa, simulação de diversas condições operativas, pelo uso dos dados de múltiplos fluxos de potência, utilização de análise linear integrada e inicialização numérica de todos os modelos para iniciar a simulação em regime permanente estacionário, mesmo em casos instáveis. Todas estas facilidades são obtidas pelo tratamento fasorial que é dado à rede elétrica, onde os transitórios eletromagnéticos são desprezados.

Por outro lado, para análise dos transitórios eletromagnéticos e do desempenho e interações dinâmicas de mais alta frequência (maior que 5 Hz) torna-se necessário considerar a dinâmica da rede elétrica. Nestes estudos, tradicionalmente utilizam-se programas convencionais de transitórios eletromagnéticos, como o ATP, EMTP e o PSCAD/EMTDC [DOMMEL 1969], [DOMMEL 1986], [MANITOBA 2016], [LEC 1987], [ZANETTA 2003], [ARAUJO 2005]. Em casos complexos, as principais dificuldades estão relacionadas à preparação de dados e na obtenção de modelos precisos da região de interesse do estudo.

Por limitação de dimensões dos programas computacionais, custo computacional, dificuldade de entrada de dados e dificuldade na inicialização do caso em regime permanente, as redes elétricas de grande porte são representadas nestes programas convencionais por modelos equivalentes reduzidos. Há então uma dificuldade para análise de múltiplas condições operativas, uma vez que cada ponto de operação exige

uma nova preparação dos modelos equivalentes, principalmente em relação aos equivalentes externos. Outro problema é que muitas vezes as dinâmicas mais lentas ficam imprecisas quando são utilizados equivalentes reduzidos. Durante esta fase de preparação de dados é muito comum surgir casos instáveis ou pouco amortecidos. Como não é possível realizar uma inicialização numérica dos modelos para que eles iniciem em regime permanente, muitas vezes não é possível utilizar os resultados da simulação para realizar um ajuste de controle por um processo de tentativa e erro mais direcionado. Dependendo da complexidade do sistema, pode até ser inviável o início dos estudos por dificuldades no acerto dos parâmetros de controle dos equipamentos ou da falta de ferramentas que melhor identifiquem os possíveis problemas dinâmicos ou de entrada de dados.

Com o objetivo de suprir estas dificuldades uma série de trabalhos de aplicação de análise linear [GOMES 2006], [LIRIO 2007a], [DANIEL 2011], [DANIEL 2012], [DANIEL 2017a] foram desenvolvidos baseados na utilização de fasores dinâmicos (FD) [STANKOVIC 2000] que permitem a consideração da dinâmica da rede de transmissão. A principal motivação para uso dos fasores dinâmicos seria pela possibilidade de uso de modelo analítico que permite análise não-linear e a linearização do sistema de equações, uma vez que os modelos baseados em FD são analíticos. No entanto, para a simulação não-linear, primordial para avaliação do desempenho dinâmico do sistema, torna-se novamente necessário recorrer aos programas tradicionais de transitórios eletromagnéticos, com as mesmas dificuldades já apontadas e com o agravante que os modelos não são exatamente os mesmos entre os programas. Isto causa uma dificuldade adicional de análise pela dúvida se as diferenças encontradas são devido às não linearidades ou às diferenças de modelagem, principalmente em relação ao uso dos equivalentes reduzidos.

Neste contexto, torna-se importante o desenvolvimento de um novo simulador de transitórios eletromagnéticos utilizando o conceito de fasores dinâmicos, a ser proposto nesta tese, para facilitar os trabalhos e análises envolvendo simulação de redes elétricas complexas que contém equipamentos FACTS [ACHA 2004] e elos de corrente contínua ou tensão contínua [SOOD 2004]. Este novo simulador apresenta uma série de vantagens em relação aos programas convencionais de transitórios eletromagnéticos, sendo as

principais a inicialização numérica em regime permanente, a análise utilizando grandezas fasoriais ou alternadas e a possibilidade de utilização integrada de análise linear, com os mesmos modelos analíticos, para ajuste coordenado de controladores ou, de forma mais geral, análise mais aprofundada e estrutural do desempenho dinâmico do sistema.

A metodologia proposta de análise e modelagem fasorial linear e não linear integradas assemelha-se à análise usualmente realizada nos estudos de transitórios eletromecânicos envolvendo, por exemplo, os programas computacionais ANATEM e PacDyn [Gomes 2009c]. A grande diferença é que o simulador proposto considera modelos adequados para análise do desempenho dinâmico do sistema em mais alta frequência, o que só era obtido tradicionalmente nos programas de simulação de transitórios eletromagnéticos convencionais que apresentam as diversas dificuldades citadas.

1.1 Revisão bibliográfica

Em [DOMMEL 1969] é apresentada a metodologia que utiliza o chamado modelo de acompanhamento para representar os elementos do sistema, o qual consiste em uma condutância ideal em paralelo com uma fonte de corrente igualmente ideal que condensa as informações passadas (tempos anteriores ao do cálculo). Mostrou-se que através da análise nodal e do método de integração trapezoidal é possível o cálculo eficiente dos transitórios eletromagnéticos. [DOMMEL 1971], [ZANETTA 2003], [NODA 2003] [FILIZADEH 2004], [DUFOUR 2011] também são referências importantes sobre transitórios eletromagnéticos em redes elétricas. Nesta tese, os modelos de acompanhamento foram aplicados a fasores dinâmicos na modelagem de elementos lineares da rede. [STOTT 1979], [KUNDUR 1994] e [KUNDUR 2003] tratam da estabilidade eletromecânica dos sistemas elétricos.

Em [KRON 1951], [KRON 1952a], [KRON 1952b], [KRON 1953] o conceito de circuitos equivalentes tensoriais é introduzido para simplificar a representação da grande variedade de fluxo de energia que pode existir entre os componentes de um sistema de

transmissão de energia interconectado. Em [PORTELA 1970] utiliza-se o conceito de tensores que relacionam grandezas no domínio da frequência.

Os trabalhos [MATTAVELLI 1997], [STANKOVIC 2000], tratam de modelagens utilizando fasores dinâmicos, porém utilizando-se o conceito de janela deslizante para o cálculo das variáveis funções do tempo.

Em [GOMES 2006] é apresentada uma nova modelagem de FD para um SVC adequada para análises em conjunto com os transitórios eletromagnéticos da rede em alta frequência (alguns kHz). Em [GUEDES 2018] este modelo foi adaptado para o GCSC. Também são apresentadas comparações com resultados de modelos convencionais, evidenciando-se os benefícios obtidos com o uso dos modelos propostos. Nos trabalhos [LIRIO 2007a] e [LIRIO 2007b] é realizada uma modelagem tensorial no domínio s do Capacitor Série Controlado a Tiristores e do Compensador Estático de Reativos considerando-se a interdependência entre as frequências.

Em [SOUZA 2007] foi realizada a modelagem linear e não-linear do Capacitor Série Controlado por Chave Autocomutada (GCSC) baseado em FD para análise dinâmica de sistemas contendo tais equipamentos. [JUSAN 2010] apresenta a aplicação de um modelo de fasor dinâmico do SVC voltado para estudos de pequenas perturbações de ressonância subsíncrona. O modelo leva em consideração a influência da dinâmica do circuito PLL. Um controlador suplementar foi projetado para amortecer os modos de torção devido à ressonância subsíncrona.

Em [DANIEL 2011] é apresentada a modelagem de um elo de tensão contínua em um programa de análise de transitórios eletromagnéticos no domínio do tempo e um modelo linearizado para o mesmo utilizando o conceito de FD para a realização de uma abordagem de análise complementar à simulação no tempo. Em [DANIEL 2012] é apresentado um modelo linearizado de frequência fundamental para um elo de tensão contínua com conversores tipo fonte de tensão (VSC) conectados em *back-to-back* e utilizando modulação por largura de pulso (PWM). As equações diferenciais e algébricas que descrevem o sistema foram formuladas em termos de FD, linearizadas em torno de um ponto de operação e representadas na forma de sistemas descritores, visando assim a obtenção de um modelo analítico que permite o uso de técnicas de análise linear (resposta

em frequência, lugar das raízes, cálculo de polos e resíduos, dentre outras) para a obtenção de uma série de informações importantes sobre a dinâmica do sistema. Em [DANIEL 2013] e [DANIEL 2017b] são apresentados estudo de aplicação de estabilizadores tanto no retificador como no inversor de um elo HVDC com as usuais estratégias de controle (controle de área mínima, controle de gama mínimo e controle da tensão CA no lado do inversor).

Os trabalhos [GOLE 1990], [JESUS 2003] e [ROLIM 2006] tratam sobre o PLL, que nesta tese serviu de base para o PLL utilizado para fornecer o ângulo de referência para o controle de tensão do SVC. Em [PILOTTO 1994], [ALVES 1999], [PILOTTO 2000], [SOUZA 2007], [ALVES 2008] são utilizadas funções de chaveamento na modelagem analítica de elementos não lineares para análises no domínio do tempo, contudo, sem a proposta de integração com análise linear presente nesta tese.

[GOMES 2005a], [GOMES 2005b], [GOMES 2009a] tratam do método de cálculo sequencial de polos dominantes, o qual foi utilizado nesta tese para obtenção de um modelo de ordem reduzida de um sistema modelado no domínio s .

[MARTI 1982], [OLIVEIRA 1983], [MORCHED 1999], [PORTELA 2002], [GUSTAVSEN 2009], [VÁSQUEZ 2001], [SILVA 2016], [MARTÍ 1993] tratam da modelagem de linhas de transmissão com parâmetros dependentes da frequência, embora o modelo utilizado nesta tese é o de Bergeron [OLIVEIRA 1983], [MARTÍ 1993] por motivos a serem discutidos no Capítulo 3.

1.2 Motivação

A principal motivação deste trabalho é que atualmente não existe um simulador no domínio do tempo, integrado com ferramentas de análise linear, que possibilite estudos avançados de sistemas elétricos de grande porte contendo uma grande penetração de equipamentos com chaveamento controlado (equipamentos FACTS e elos HVDC). Outro

ponto importante é que tal simulador considere os transitórios eletromagnéticos da rede, tão importantes para a precisão e validade dos resultados.

Os programas convencionais de simulação de estabilidade transitória permitem estudos em sistemas de grande porte e podem ser integrados a ferramentas de análise linear, no entanto a sua precisão é limitada a fenômenos de baixa frequência (até 5 Hz).

Por outro lado, os programas convencionais de simulação de transitórios eletromagnéticos possibilitam a análise em maior faixa de frequência, mas não possuem uma integração com ferramentas de análise linear e usualmente requerem um grande esforço de preparação de dados, acerto de pontos de operação e eventualmente a necessidade de simulação de longo período para inicialização do sistema em regime permanente. Outra dificuldade é que em um sistema com vários equipamentos de eletrônica de potência, a quantidade de chaveamentos por ciclo pode deteriorar a eficiência computacional de programas convencionais de transitórios eletromagnéticos [GUBIAN 1991]. Nos programas com interpolação de passo (por exemplo, PSCAD/EMTDC) tal número excessivo de transições de estado das chaves (liga/desliga) poderia acarretar em uma elevada quantidade de pontos de interpolação, tornando o processo iterativo mais lento ou até potencialmente ocasionando erros no resultado da simulação (analogia com comportamento de sistemas caóticos) [BOYCE 2009].

Portanto, não existe uma ferramenta intermediária entre aquela convencional para simulação de transitórios eletromecânicos (ANATEM, PSS/E) e a convencional para simulação de transitórios eletromagnéticos (ATP, EMTP, PSCAD/EMTDC) que traga uma maior facilidade de uso e maior poder de análise, principalmente em estudos de ajuste coordenado de controladores e análise de interações dinâmicas entre múltiplos equipamentos.

1.3 Objetivos do trabalho

O principal objetivo do trabalho é propor um novo método de simulação de redes elétricas com múltiplos equipamentos chaveados, considerando os transitórios eletromagnéticos, com diferenciais em relação aos simuladores existentes.

Um destes diferenciais é permitir uma análise linear e não-linear integrada, uma vez que utiliza modelos analíticos que podem ser linearizados. Assim, podem ser utilizados os mesmos modelos (equacionamento compatível).

No atual estado da arte, a resposta no tempo de um sistema para pequenas perturbações (análise linear) pode ser obtida através dos polos e resíduos [GOMES 2005a], [GOMES 2005b], [GOMES 2009a] ou pela transformada inversa de Fourier da resposta em frequência [GÓMEZ 2009], que eram ferramentas com algumas dificuldades de utilização e potenciais problemas numéricos. O simulador proposto permite a simulação direta, por integração numérica, para pequenas e grandes perturbações, preenchendo assim uma lacuna existente entre simuladores.

Outra vantagem de se utilizar modelos analíticos é a possibilidade de inicialização de todas as variáveis em regime permanente, mesmo em casos instáveis. Com isto é possível aproveitar pontos de operação de programas de cálculo de fluxo de potência para a realização de simulações sistemáticas de diversas condições operativas do sistema elétrico, sem necessidade de reajuste de casos. Também é possível aproveitar os dados de estudos de estabilidade, reduzindo significativamente o esforço de preparação de dados, principalmente em sistemas de grande porte.

Observa-se que o simulador de fasores dinâmicos proposto neste trabalho pode ser considerado uma ferramenta intermediária entre aquela convencional para simulação de transitórios eletromecânicos e a convencional para simulação de transitórios eletromagnéticos. Tal simulador proposto permite a realização de uma gama de estudos envolvendo equipamentos FACTS e HVDC em um mesmo ambiente computacional.

1.4 Metodologia

A metodologia adotada no trabalho consistiu em desenvolver as equações de solução dos circuitos através do método trapezoidal aplicado aos elementos da rede modelados como fasores dinâmicos dos modelos de acompanhamento. Foi ainda desenvolvida uma metodologia de solução simultânea da rede elétrica e de elementos não lineares em geral que devem ser modelados por modelos de acompanhamento linearizados desacoplados em frequência por um método Quasi-Newton. No trabalho foi utilizado um modelo de

compensador estático de reativos (SVC) como exemplo prático de elemento não linear. No entanto o algoritmo e metodologia são gerais e extensíveis, em princípio, para qualquer outro equipamento com chaveamento controlado. A ideia principal foi mostrar que é possível a integração de modelos de equipamentos FACTS utilizando fasores dinâmicos com uma modelagem modificada de rede baseada em modelos de acompanhamento presentes em programas convencionais de simulação de transitórios eletromagnéticos.

As implementações do protótipo do novo simulador e os testes da modelagem proposta foram feitos no Programa MATLAB, devido às facilidades oferecidas para se trabalhar com matrizes e simplicidade de programação. Os resultados obtidos foram comparados com simulações do mesmo sistema teste no Programa PSCAD/EMTDC [MANITOBA 1994], que foi usado como ferramenta de validação dos modelos baseados em fasores dinâmicos.

Na tese está sendo proposta uma metodologia de análise baseada na utilização conjunta do algoritmo desenvolvido de simulação não-linear no domínio do tempo com a análise linear para avaliação do desempenho dinâmico de equipamentos com chaveamento controlado, com exemplos de aplicação usando o TCR.

1.5 Contribuições da Tese

As contribuições do trabalho correspondem aos seguintes novos desenvolvimentos:

- Metodologia para simulação de transitórios baseada em fasores dinâmicos (DPTS) voltada para a análise de redes elétricas contendo equipamentos não-lineares (por exemplo, os equipamentos FACTS), os quais interagem dinamicamente entre si e com a rede e suas não linearidades;
- Modelos de acompanhamento de fasores dinâmicos (MAFD), cujas equações são deduzidas e interpretadas como modelos tensoriais;

- Modelo Linearizado de Acompanhamento (MLA) para tornar possível a inclusão de elementos não-lineares no simulador DPTS de maneira eficiente e com resultados precisos;
- Algoritmo de solução para a rede contendo equipamentos não-lineares (neste trabalho utilizam-se SVCs para estudos de validação do simulador), o qual foi solucionado em cada passo de integração no tempo. O Método *Quasi-Newton* é utilizado no algoritmo para obtenção de matriz jacobiana simplificada que considera de maneira eficiente os fasores dinâmicos das componentes harmônicas da rede e do SVC;
- Algoritmo de inicialização automática de variáveis para permitir análise de transitórios para múltiplas condições operativas partindo-se do regime permanente.

Outra importante contribuição da tese é a proposta de integração das análise linear e não-linear pela utilização de uma mesma modelagem baseada em fasores dinâmicos.

1.6 Aplicações

Como aplicações do simulador baseado em fasores dinâmicos proposto neste trabalho, podemos destacar:

- Estudos de desempenho dinâmico (*dynamic performance*) de redes elétricas contendo equipamentos não-lineares como controladores FACTS e sistemas HVDC, desde que se desenvolvam modelos para estes equipamentos (especificamente neste trabalho foram desenvolvidos o modelo de FD e os respectivos estudos para o SVC);
- Ajuste coordenado de controladores de equipamentos FACTS e controladores em geral considerando-se suas interações com a rede elétrica;

- Validação de simulações de baixa frequência (transitórios eletromecânicos) de modo direto em um mesmo simulador;
- Simulação de sistemas com número elevado de equipamentos, avaliando possíveis interações dinâmicas adversas entre equipamentos ou ressonâncias na rede de transmissão;

1.7 Estrutura da tese

Como diretriz geral, esta tese foi escrita de forma cronológica e os resultados e versões do DPTS (método principal proposto) foram sendo documentados de forma sequencial, o que tem um aspecto interessante, pois revela ao leitor como deu-se a evolução de um programa de transitórios eletromagnéticos. A versão final apresentada do mesmo ainda é considerada um protótipo, uma vez que ainda necessita de outros desenvolvimentos para que possa se tornar uma ferramenta de uso difundido ou comercial. Posto isto, a tese está organizada da seguinte forma:

O Capítulo 2 descreve como se pode modelar sistemas elétricos através do conceito de fasores dinâmicos. Um circuito simples RLC é modelado e simulado para fins de exemplificação.

O Capítulo 3 trata dos modelos de acompanhamentos de fasores dinâmicos para resistência, indutância, capacitância, linha de transmissão com e sem perdas. Estes são baseados na aplicação do método trapezoidal aos elementos básicos da rede e modelados como fasores dinâmicos resultando em modelos de acompanhamento. É apresentado o desenvolvimento matemático das equações necessárias para posterior implementação de um algoritmo básico no MATLAB para solução de transitórios de uma rede genérica.

O Capítulo 4 descreve a formulação para cálculo de transitórios eletromagnéticos de fasores dinâmicos por análise nodal e do primeiro algoritmo feito em MATLAB do chamado simulador de transitórios de fasores dinâmicos (DPTS). Os resultados são comparados com aqueles produzidos pela metodologia de integração trapezoidal

tradicional e validados através de simulações nos programas MATLAB e PSCAD/EMTDC.

O Capítulo 5 trata da inclusão de um elemento não-linear (SVC) no simulador de fasores dinâmicos (DPTS) onde objetiva-se mostrar a metodologia que viabiliza a simulação de redes contendo modelos de fasores dinâmicos de equipamentos FACTS. Para isto, foi desenvolvida uma modelagem para elementos não-lineares chamada Modelo Linearizado de Acompanhamento (MLA) e a solução entre este modelo não-linear e a rede linear é implementada através de um método desacoplado. Também é apresentada a incorporação da modelagem de harmônicos no simulador DPTS e como seria a extensão da metodologia para uma modelagem trifásica da rede.

O Capítulo 6 introduz um dos conceitos propostos neste trabalho, que é o da proposição de uma ferramenta para análises linear e não-linear integradas, onde são discutidas as vantagens que o simulador proposto oferece, uma vez que os modelos tanto da rede como dos equipamentos não-lineares possuem equações compatíveis, o que facilita a implementação de novos modelos ao simulador e que tem o potencial de estabelecer uma mudança de paradigma com relação a estudos modernos de desempenho dinâmico, os quais incluem de maneira crescente equipamentos FACTS e elos de corrente contínua e tensão contínua.

No Capítulo 7 apresenta as considerações finais do trabalho, que englobam as conclusões (gerais e específicas) e as sugestões de possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

Conceito de Fasores Dinâmicos e Grandezas Tensoriais

2.1 Definição Básica de Fasores Dinâmicos

A Série de Fourier permite a representação de funções periódicas como sinais senoidais com coeficientes constantes e frequências múltiplas do inverso do período do sinal [CLOSE 1975], [PAICE 1996]. Generalizando, uma corrente ou tensão da rede elétrica função do tempo não-periódica $f(t)$ pode ser representada [GOMES 2006], [LIRIO 2007a], [SOUZA 2007], [DANIEL 2011], [DANIEL 2012], [DANIEL 2017a] com coeficientes variáveis no tempo da seguinte forma:

$$f(t) = \sum_h F_h^{\text{Re}}(t) \cos(h\omega t) - F_h^{\text{Im}}(t) \sin(h\omega t), \quad (2.1)$$

onde h é um índice inteiro positivo das componentes harmônicas, ω é a frequência angular nominal do sistema e os coeficientes $F_h^{\text{Re}}(t)$ e $F_h^{\text{Im}}(t)$ são funções do tempo.

Geralmente em sistemas não-lineares alimentados por fontes senoidais de frequência única, o regime permanente será não-senoidal periódico. Isto ocorre quando os componentes não-lineares são compostos por elementos chaveados periodicamente, como os equipamentos de eletrônica de potência ou elementos descritos por funções analíticas como é o caso de elementos com saturação. Neste trabalho utilizou-se a frequência ω igual à da frequência inicial do sistema antes dos distúrbios provocados, normalmente igual à frequência síncrona.

Consequentemente as variáveis do sistema em regime permanente podem ser descritas por uma série de Fourier de coeficientes constantes. No entanto, durante um transitório, a periodicidade da resposta deixa de ser válida, até o sistema atingir um novo regime permanente, que novamente pode ser descrito por uma série de Fourier de coeficientes

constantes. Para o período transitório, onde não há periodicidade, os coeficientes variam no tempo e podem utilizar esse tipo de representação.

Observa-se que funções de excitação evidentemente não-periódicas como o degrau unitário $u(t)$ ou impulso unitário $\delta(t)$ podem ser representadas de forma exata por (2.1). Há diversas combinações válidas, utilizando a mais simples que considera apenas o termo $h=1$ do somatório, tem-se para o degrau unitário:

$$F_1^{\text{Re}}(t) = \cos(\omega t)u(t), \quad (2.2)$$

$$F_1^{\text{Im}}(t) = -\sin(\omega t)u(t). \quad (2.3)$$

Substituindo-se (2.2) e (2.3) em (2.1), obtém-se:

$$f(t) = [\cos(\omega t)u(t)]\cos(\omega t) - [-\sin(\omega t)u(t)]\sin(\omega t) = u(t). \quad (2.4)$$

É importante observar que $F_1^{\text{Re}}(t)$ e $F_1^{\text{Im}}(t)$ variam no tempo de forma cossenoidal e senoidal, respectivamente, na frequência fundamental, para produzir o sinal constante do degrau em $f(t)$ após o tempo inicial. De forma análoga, o impulso unitário pode ser representado por $F_1^{\text{Re}}(t) = \delta(t)$ e $F_1^{\text{Im}}(t) = 0$.

Como será exemplificado na seção 2.4, a resposta a estas excitações será resultado do equacionamento do sistema considerando que todas as variáveis do sistema são representadas da forma dada em (2.1). Outro exemplo é a Figura 4.5 onde a tensão transitória de energização de um sistema com linha de transmissão de parâmetros distribuídos, que é claramente uma função não periódica, com variações transitórias muito mais rápidas do que o período, foi representada de forma exata utilizando (2.1). Escrevendo esta equação na forma complexa, obtém-se a definição dos chamados Fasores Dinâmicos (FD):

$$\tilde{F}_h(t) = F_h^{\text{Re}}(t) + jF_h^{\text{Im}}(t), \quad (2.5)$$

O primeiro termo $\tilde{F}_1(t)$ é o fasor dinâmico fundamental e os demais $\tilde{F}_h(t)$ ($h \neq 1$) são os fasores dinâmicos harmônicos. A função original pode ser reconstituída a partir dos fasores dinâmicos de duas formas, pela projeção dada em (2.3) ou pela soma dos termos

conjugados dados em (2.4), de forma análoga aos fasores convencionais utilizados no cálculo de circuitos elétricos em regime permanente.

$$f(t) = \Re \left\{ \sum_h \tilde{F}_h(t) e^{jh\omega t} \right\}, \quad (2.6)$$

$$f(t) = \sum_h \frac{\tilde{F}_h(t) e^{jh\omega t} + \tilde{F}_h^*(t) e^{-jh\omega t}}{2}. \quad (2.7)$$

Deve-se observar que o termo $\tilde{F}_h(t) e^{jh\omega t}$ pode ser denominado de fasor dinâmico girante, como extensão da nomenclatura usada em circuitos [CLOSE 1975]. Se considerarmos somente o fasor de frequência fundamental ($h=1$) em (2.7) teremos:

$$f(t) = \frac{\tilde{F}_1(t) e^{j\omega t} + \tilde{F}_1^*(t) e^{-j\omega t}}{2}, \quad (2.8)$$

onde,

$$\tilde{F}_1(t) = F_1^{\text{Re}}(t) + jF_1^{\text{Im}}(t). \quad (2.9)$$

Outras relações também podem ser obtidas, como por exemplo considerando-se que o fasor é definido por um módulo $F_1(t)$ e ângulo θ , ao invés de suas projeções real e imaginária.

$$\tilde{F}_1(t) = F_1(t) e^{j\theta}. \quad (2.10)$$

Neste caso, as mesmas projeções podem ser obtidas da seguinte forma:

$$f(t) = \Re \left\{ F_1(t) e^{j\theta} e^{j\omega t} \right\} = \Re \left\{ F_1(t) \cos(\omega t + \theta) + jF_1(t) \sin(\omega t + \theta) \right\}, \quad (2.11)$$

$$f(t) = F_1(t) \cos(\omega t + \theta), \quad (2.12)$$

$$f(t) = \frac{1}{2} \left(F_1(t) e^{j(\omega t + \theta)} - F_1(t) e^{-j(\omega t + \theta)} \right) = \frac{1}{2} \left(F_1(t) e^{j\theta} e^{j\omega t} - F_1(t) e^{-j\theta} e^{-j\omega t} \right), \quad (2.13)$$

ou

$$f(t) = \frac{1}{2} \left[\left(F_1^{\text{Re}}(t) + jF_1^{\text{Im}}(t) \right) e^{j\omega t} - \left(F_1^{\text{Re}}(t) - jF_1^{\text{Im}}(t) \right) e^{-j\omega t} \right], \quad (2.14)$$

ou ainda

$$f(t) = \frac{1}{2} F_1^{\text{Re}}(t) (e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}) + \frac{j}{2} F_1^{\text{Im}}(t) (e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}), \quad (2.15)$$

$$f(t) = F_1^{\text{Re}}(t) \cos(\omega t) - F_1^{\text{Im}}(t) \sin(\omega t). \quad (2.16)$$

Nos trabalhos [MATTAVELLI 1997] e [STANKOVIC 2000] utilizou-se uma janela deslizante que, para um modelo com apenas o fasor de frequência fundamental, restringia a aplicação do método de fasores dinâmicos a baixas frequências (até 30 Hz). Neste caso aumentando-se a quantidade de fasores harmônicos, a frequência máxima de validade do modelo era aumentada.

Em [GOMES 2006] não se utilizou a janela deslizante e sim uma transformação analítica variável no tempo equivalente à Transformação de Park para o modelo de frequência fundamental. Esta abordagem permite a extensão da aplicação do método para frequências mais elevadas (algumas centenas ou até milhares de Hertz).

A Transformação de Park (também conhecida como transformada d-q-0) converte um sistema trifásico (abc) de correntes ou tensões em um sistema de vetores ortogonais referenciados a um sistema de coordenadas d-q e sincronizados com a frequência da componente de sequência positiva da rede CA. Neste caso, ignorando-se a sequência zero, obtêm-se pela Transformação de Park a seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} f_a(t) \\ f_b(t) \\ f_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d(t) \\ f_q(t) \end{bmatrix}, \quad (2.17)$$

onde o eixo d está na referência angular $\theta=0^\circ$ e o eixo q na referência $\theta=90^\circ$. Para $\theta=\omega t$:

$$f_a(t) = f_d(t) \cos(\omega t) - f_q(t) \sin(\omega t). \quad (2.18)$$

Portanto, vemos que (2.18) é equivalente a (2.16), ou seja, em frequência fundamental, a modelagem da rede por componentes d e q é equivalente à modelagem da rede através de fasores dinâmicos. Nos desenvolvimentos analíticos das equações deste trabalho, utilizou-se como base o método de fasores dinâmicos para solução não-linear de transitórios eletromagnéticos.

2.2 Conceito de Tensores Aplicado a Sistemas de Potência

O método tensorial aplicado a sistemas de potência é detalhado por [PORTELA 1970], onde utilizou-se o conceito de tensores [KRON 1951] que relacionam grandezas no domínio da frequência. Segue um trecho extraído *ipsis litteris* de [PORTELA 1970] que expressa a importância e a necessidade de se trabalhar com tensores em modelagens de determinados tipos de sistemas elétricos:

“Desta forma, a teoria das redes eléctricas tem se baseado normalmente em formulações complexas, ignorando o carácter tensorial das relações. Tal como na alegoria platónica, a formulação complexa pode ser considerada uma sombra da realidade tensorial. Para os circuitos lineares estáticos passivos, a sombra é uma boa imagem da realidade. Mas já nas máquinas rotativas, ainda dentro da linearidade, essa sombra não traduz completamente a realidade, que tem mais dimensões que a sombra. No entanto, o homem, excessivamente habituado a lidar com as sombras, procurou manter a estrutura das mesmas.”

De modo a ilustrar os tipos de representação de redes elétricas, consideremos um circuito composto apenas por uma fonte senoidal ideal e um indutor linear.

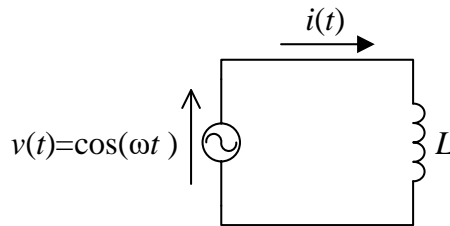


Figura 2.1 – Circuito com fonte cossenoidal e indutor.

A equação diferencial que descreve o comportamento do circuito da Figura 2.1 é:

$$v(t) - L \frac{di(t)}{dt} = 0. \quad (2.19)$$

Podemos representar a tensão da fonte por fasores da seguinte forma:

$$v(t) = \cos(\omega t) = \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2}. \quad (2.20)$$

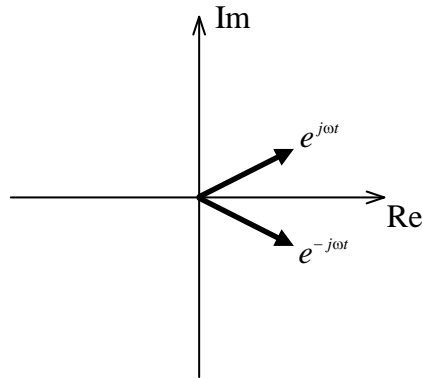


Figura 2.2 – Fasores de amplitude unitária no plano complexo.

O termo $e^{j\omega t}$ representa um vetor no plano complexo com amplitude unitária que, com o passar do tempo, gira no sentido trigonométrico (anti-horário) com velocidade angular ω enquanto o termo $e^{-j\omega t}$ representa um outro vetor com amplitude unitária que gira no sentido horário também com velocidade angular ω , conforme ilustrado na Figura 2.2. Em $t=0$, ambos vetores são coincidentes e repousam sobre a parte positiva do eixo real.

Se a corrente for nula em $t=0^+$,

$$\begin{aligned}
 i(t) &= \frac{1}{L} \int_0^t \frac{e^{j\omega t'} + e^{-j\omega t'}}{2} dt' = \int_0^t \frac{e^{j\omega t'}}{2L} dt' + \int_0^t \frac{e^{-j\omega t'}}{2L} dt' = \\
 &= \frac{1}{j\omega L} \left(\frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{2} \right) = \frac{1}{\omega L} \left(\frac{e^{j\omega t - \frac{\pi}{2}} + e^{-j\omega t - \frac{3\pi}{2}}}{2} \right). \quad (2.21)
 \end{aligned}$$

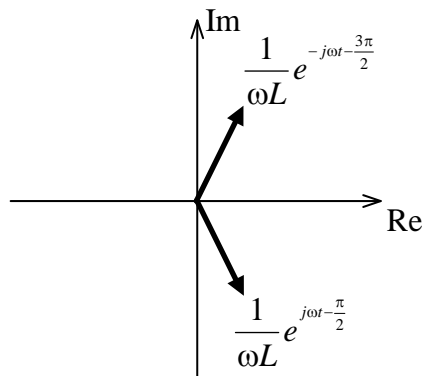


Figura 2.3 – Fasores (ou vetores) girantes da corrente no plano complexo.

Os termos $e^{j\omega t - \pi/2}$ e $e^{-j\omega t - 3\pi/2}$ representam vetores que giram nos sentidos anti-horário e horário, respectivamente (Figura 2.3). Em $t=0$, estes vetores estão sobre o eixo imaginário e possuem direções opostas. Na representação fasorial clássica [CLOSE 1975] os fasores são definidos como sendo a projeção sobre o eixo real do fasor girante de sentido anti-horário, logo:

$$e^{j\omega t} = (1e^{j0})e^{j\omega t} = \tilde{V}e^{j\omega t}, \quad (2.22)$$

$$v(t) = \Re\{\tilde{V}e^{j\omega t}\} = \Re\{\cos(\omega t) - j\sin(\omega t)\} = \cos(\omega t), \quad (2.23)$$

$$\frac{1}{\omega L}e^{j\omega t - \frac{\pi}{2}} = \left(\frac{1}{\omega L}e^{-j\frac{\pi}{2}}\right)e^{j\omega t} = \tilde{I}e^{j\omega t}, \quad (2.24)$$

$$i(t) = \Re\{\tilde{I}e^{j\omega t}\} = \Re\left\{\frac{1}{\omega L}\cos(\omega t - \pi/2) - j\frac{1}{\omega L}\sin(\omega t - \pi/2)\right\} = \frac{1}{\omega L}\cos(\omega t - \pi/2). \quad (2.25)$$

Logo, na representação clássica de fasores, a impedância é uma grandeza complexa que representa a relação entre os fasores de tensão e corrente \dot{V} e \dot{I} para o regime permanente:

$$\bar{Z} = \frac{\dot{V}}{\dot{I}} = \frac{1e^{j0}}{\frac{1}{\omega L}e^{-j\frac{\pi}{2}}} = \omega L e^{j\frac{\pi}{2}} = \omega L \cos(\pi/2) + j\omega L \sin(\pi/2) = j\omega L, \quad (2.26)$$

$$[\dot{V}]_{1 \times 1} = [j\omega L]_{1 \times 1} [\dot{I}]_{1 \times 1}. \quad (2.27)$$

Seja uma representação onde trabalha-se com as componentes real e imaginária do fasor girante de sentido anti-horário:

$$e^{j\omega t} = V_{\text{Re}} + jV_{\text{Im}}, \quad (2.28)$$

$$V_{\text{Re}} = \Re\{e^{j\omega t}\} = \Re\{\cos(\omega t) - j\sin(\omega t)\} = \cos(\omega t), \quad (2.29)$$

$$V_{\text{Im}} = \Im\{e^{j\omega t}\} = \Im\{\cos(\omega t) - j\sin(\omega t)\} = -\sin(\omega t), \quad (2.30)$$

$$\frac{1}{\omega L} e^{j\omega t - \frac{\pi}{2}} = I_{\text{Re}} + jI_{\text{Im}}, \quad (2.31)$$

$$I_{\text{Re}} = \Re e \left\{ \frac{1}{\omega L} e^{j\omega t - \frac{\pi}{2}} \right\} = \Re e \left\{ \frac{1}{\omega L} \cos(\omega t - \pi/2) - j \frac{1}{\omega L} \sin(\omega t - \pi/2) \right\} = \frac{1}{\omega L} \cos(\omega t - \pi/2), \quad (2.32)$$

$$I_{\text{Im}} = \Im m \left\{ \frac{1}{\omega L} e^{j\omega t - \frac{\pi}{2}} \right\} = \Im m \left\{ \frac{1}{\omega L} \cos(\omega t - \pi/2) - j \frac{1}{\omega L} \sin(\omega t - \pi/2) \right\} = -\frac{1}{\omega L} \sin(\omega t - \pi/2), \quad (2.33)$$

$$\begin{bmatrix} V_{\text{Re}} \\ V_{\text{Im}} \end{bmatrix} = \mathbf{Z} \begin{bmatrix} I_{\text{Re}} \\ I_{\text{Im}} \end{bmatrix}, \quad (2.34)$$

$$\begin{bmatrix} V_{\text{Re}} \\ V_{\text{Im}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\text{Re}} \\ I_{\text{Im}} \end{bmatrix}, \quad (2.35)$$

$$V_{\text{Re}} = Z_{11} I_{\text{Re}} + Z_{12} I_{\text{Im}}, \quad (2.36)$$

$$V_{\text{Im}} = Z_{21} I_{\text{Re}} + Z_{22} I_{\text{Im}}, \quad (2.37)$$

$$\omega L \cos(\omega t) = Z_{11} \cos(\omega t - \pi/2) - Z_{12} \sin(\omega t - \pi/2), \quad (2.38)$$

$$-\omega L \sin(\omega t) = Z_{21} \cos(\omega t - \pi/2) - Z_{22} \sin(\omega t - \pi/2). \quad (2.39)$$

Por identidade trigonométrica, $\cos(\omega t - \pi/2) = \sin(\omega t)$ e $\sin(\omega t - \pi/2) = -\cos(\omega t)$, logo:

$$\omega L \cos(\omega t) = Z_{11} \sin(\omega t) + Z_{12} \cos(\omega t) \quad \therefore Z_{11} = 0 \text{ e } Z_{12} = \omega L, \quad (2.40)$$

$$-\omega L \sin(\omega t) = Z_{21} \sin(\omega t) + Z_{22} \cos(\omega t) \quad \therefore Z_{21} = -\omega L \text{ e } Z_{22} = 0, \quad (2.41)$$

$$\begin{bmatrix} V_{\text{Re}} \\ V_{\text{Im}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega L \\ -\omega L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\text{Re}} \\ I_{\text{Im}} \end{bmatrix}. \quad (2.42)$$

A matriz \mathbf{Z} é um tensor que relaciona as componentes real e imaginária dos fasores girantes de tensão e corrente para o regime permanente e é composta apenas por

elementos reais. Considere-se agora um circuito composto por uma fonte senoidal ideal e um elemento não-linear chaveado, como por exemplo um TCR.

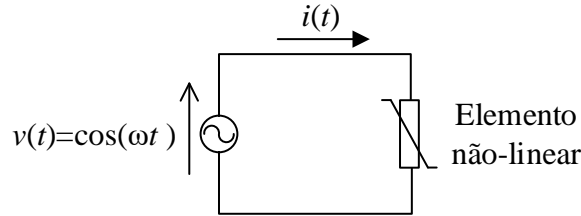


Figura 2.4 – Circuito com fonte cossenoidal e elemento não-linear.

A relação entre tensão e corrente para este elemento não-linear é dada pela equação:

$$i(t) = q(t)v(t), \quad (2.43)$$

onde q representa uma função de chaveamento que pode ser descrita pela Série de Fourier,

$$q(t) = \kappa_1 + \sum_h \kappa_2(h) \cos[2h\omega t - \kappa_3(h)], \quad (2.44)$$

e h é o índice dos harmônicos, κ_1 é constante, κ_2 e κ_3 são funções de h . Neste caso, a matriz que relaciona as componentes real e imaginária dos fasores girantes de tensão e corrente para o regime permanente tem a forma:

$$\begin{bmatrix} V_{\text{Re}} \\ V_{\text{Im}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\text{Re}} \\ I_{\text{Im}} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{bmatrix}, \quad (2.45)$$

onde \mathbf{Q} é um tensor assimétrico, ou seja, $\mathbf{Q}^T \neq \mathbf{Q}$. Em sistemas alimentados por fontes senoidais, os equipamentos com comportamento não-linear produzem componentes harmônicas em regime permanente. No caso do regime transitório, tais grandezas são variáveis no tempo. Nesta metodologia dita tensorial, as grandezas são descritas por componentes (reais e imaginárias) que são coeficientes de grandezas da forma $e^{\xi t}$, onde ξ é uma variável complexa no domínio da frequência. O método tensorial é equivalente ao método de fasores dinâmicos no domínio da frequência, pois ambos se assemelham em seus desenvolvimentos analíticos, contudo, possuem bases conceituais diferentes.

2.3 Modelagem de Transitórios Eletromecânicos

Nos programas tradicionais de simulação de transitórios eletromecânicos [KUNDUR 1994], [KUNDUR 2003], [STOTT 1979], [CEPEL 2017] a rede elétrica é representada de forma fasorial na frequência fundamental da rede (50 Hz ou 60 Hz) e os elementos dinâmicos e sistemas de controle associados são representados por um conjunto de equações diferenciais e algébricas. Este conjunto de equações é solucionado (por método alternado ou simultâneo) de modo a se obter a resposta no tempo do sistema frente a distúrbios ou outros tipos de evento. Este tipo de modelagem objetiva a análise de fenômenos eletromecânicos de baixa frequência (até 5 Hz) e os transitórios eletromagnéticos da rede são desprezados.

Dessa forma, as tensões e correntes do sistema são relacionadas pela matriz de admitância nodal, a qual pode ser escrita na forma complexa ou por um agrupamento de matrizes (tensores) de ordem 2 que relacionam as partes real e imaginária dos fasores de tensões e correntes. Esta relação entre fasores da rede, na frequência fundamental, é puramente algébrica. Já os equipamentos conectados à rede e sistemas de controle associados são representados por equações diferenciais e injetam correntes fasoriais na rede.

2.3.1 Modelagem de Rede na Simulação de Transitórios Eletromecânicos

As explicações dadas até aqui constituem a interpretação convencional que a maioria dos engenheiros e pesquisadores usualmente tem sobre a forma de interpretar os fasores de regime permanente presentes na modelagem de transitórios eletromecânicos, a qual é oriunda da teoria clássica de circuitos elétricos [DIRECTOR 1975]. Contudo, é possível uma outra forma de interpretação [DANIEL 2017a]. Para isto consideremos como ponto de partida um contexto onde deseja-se representar a dinâmica (transitórios) da rede, que é o caso da modelagem de transitórios eletromagnéticos.

Neste contexto, supondo que não se utilize modelos de parâmetros distribuídos para as linhas de transmissão, mas sim modelos tipo π equivalente, e que os FD sejam utilizados na representação das tensões e correntes para todos elementos de uma rede com

parâmetros exclusivamente concentrados, então tome-se como exemplo o seguinte sistema de equações diferenciais:

$$\begin{cases} LI^{\text{Re}}(t) + RI^{\text{Re}}(t) - \omega LI^{\text{Im}}(t) + V_c^{\text{Re}}(t) - V^{\text{Re}}(t) = 0; \\ LI^{\text{Im}}(t) + \omega LI^{\text{Re}}(t) + RI^{\text{Im}}(t) + V_c^{\text{Im}}(t) - V^{\text{Im}}(t) = 0; \\ CV_c^{\text{Re}}(t) - I^{\text{Re}}(t) - \omega CV_c^{\text{Im}}(t) = 0; \\ CV_c^{\text{Im}}(t) - I^{\text{Im}}(t) + \omega CV_c^{\text{Re}}(t) = 0; \end{cases} \quad (2.46)$$

o qual modelado em espaço-estado fica na forma:

$$\begin{bmatrix} \frac{dI^{\text{Re}}(t)}{dt} \\ \frac{dI^{\text{Im}}(t)}{dt} \\ \frac{dV_c^{\text{Re}}(t)}{dt} \\ \frac{dV_c^{\text{Im}}(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & -\frac{1}{L} & 0 \\ -\omega & -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 & 0 & \omega \\ 0 & \frac{1}{C} & -\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^{\text{Re}}(t) \\ I^{\text{Im}}(t) \\ V_c^{\text{Re}}(t) \\ V_c^{\text{Im}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^{\text{Re}}(t) \\ V^{\text{Im}}(t) \end{bmatrix}, \quad (2.47)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & -\frac{1}{L} & 0 \\ -\omega & -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 & 0 & \omega \\ 0 & \frac{1}{C} & -\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^{\text{Re}}(t) \\ I^{\text{Im}}(t) \\ V_c^{\text{Re}}(t) \\ V_c^{\text{Im}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^{\text{Re}}(t) \\ V^{\text{Im}}(t) \end{bmatrix}, \quad (2.48)$$

$$\begin{bmatrix} V^{\text{Re}} \\ V^{\text{Im}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -\omega L & 1 & 0 \\ \omega L & R & 0 & 1 \\ -\frac{1}{C} & 0 & 0 & -\omega \\ 0 & -\frac{1}{C} & \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^{\text{Re}} \\ I^{\text{Im}} \\ V_c^{\text{Re}} \\ V_c^{\text{Im}} \end{bmatrix}. \quad (2.49)$$

Fazendo-se todos os termos de derivada iguais a zero (regime permanente) em (2.47) tal modelagem recairá na modelagem de rede semelhante àquela utilizada na análise de transitórios eletromecânicos (2.49) estabelecendo-se deste modo uma nova forma de

interpretar os fasores de rede da modelagem eletromecânica, ou seja, não apenas como meros fasores da teoria clássica de circuitos [DIRECTOR 1975], mas sim como FD efetivamente [GOMES 2006].

Embora a dinâmica da rede tenha sido desprezada, os fasores das tensões e correntes podem, de fato, variar no tempo quando forem consideradas as dinâmicas dos diversos equipamentos do sistema (máquinas síncronas, compensadores estáticos, elos de corrente contínua, etc.) incluindo o sistema de controle, modelados por equações algébricas e diferenciais, como dado em:

$$\begin{bmatrix} V^{\text{Re}} \\ V^{\text{Im}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -\omega L + \frac{1}{\omega C} \\ \omega L - \frac{1}{\omega C} & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^{\text{Re}} \\ I^{\text{Im}} \end{bmatrix}, \quad (2.50)$$

$$\begin{bmatrix} I^{\text{Re}} \\ I^{\text{Im}} \end{bmatrix} = \frac{1}{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \begin{bmatrix} R & \omega L - \frac{1}{\omega C} \\ -\omega L + \frac{1}{\omega C} & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^{\text{Re}} \\ V^{\text{Im}} \end{bmatrix}. \quad (2.51)$$

Para obter-se a matriz de admitância que relaciona as componentes real e imaginária das tensões e correntes, basta eliminar (por substituição de variáveis ou eliminação de Kron) as componentes real e imaginária da tensão do capacitor utilizando-se as duas últimas equações e em seguida inverter a matriz, conforme mostrado em (2.51).

2.3.2 Modelagem de Equipamentos FACTS e Elos HVDC

O conceito de FACTS [HINGORANI 1988], [HINGORANI 1999] está relacionado aos equipamentos baseados em dispositivos de eletrônica de potência [ERICKSON 1997], [RASHID 2001], [MOHAN 2003] (como tiristores, IGBTs, dentre outros) que proporcionam um rápido controle de tensão e potência em sistemas ca, fazendo com que a operação de tais sistemas se torne mais flexível sob vários aspectos, como por exemplo o controle dos fluxos de potência nas linhas de transmissão, melhoria da estabilidade a pequenos ou grandes distúrbios, controle dos fluxos ou fator de potência de cargas, dentre outras aplicações [WATANABE 2004], [CAVALIERE 2002], [BORRÉ 2011],

[DANIEL 2010]. Assim permitem maior flexibilidade de controle dos sistemas elétricos, neste caso entende-se flexibilidade como a capacidade de rápida e contínua alteração dos parâmetros que controlam a dinâmica de funcionamento do sistema elétrico, além de permitirem a elevação no nível de transmissão das linhas, utilizando até a máxima capacidade térmica da mesma.

Na modelagem de transitórios eletromecânicos, todos os equipamentos conectados à rede que possuem dinâmicas representadas (como geradores, motores, reguladores, estabilizadores, cargas dinâmicas, elos HVDC, Equipamentos FACTS e sistemas de controle associados) são representados por injeções de corrente ou tensão (equivalentes de Thévenin ou Norton) variáveis no tempo, as quais são reunidas com as equações fasoriais da rede para obtenção da solução a cada passo da integração numérica. A única exceção são os geradores modelados como barra infinita, onde as barras de conexão dos mesmos são eliminadas para obtenção da solução de rede.

2.4 Circuito RLC Modelado por Fasores Dinâmicos

De modo a ilustrar a representação de variáveis elétricas por fasores dinâmicos, consideremos um circuito RLC simples alimentado por uma fonte senoidal ideal:

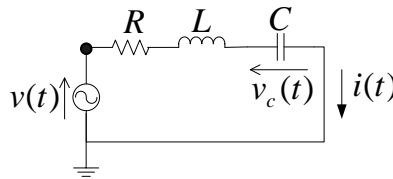


Figura 2.5 - Circuito RLC de exemplo.

As equações diferenciais que descrevem o comportamento do circuito da Figura 2.5 são:

$$Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + v_c(t) = v(t), \quad (2.52)$$

$$i(t) = C \frac{dv_c(t)}{dt}. \quad (2.53)$$

Estas equações lineares com parâmetros invariantes no tempo (2.52) e (2.53) podem ser escritas como função dos fasores dinâmicos na frequência fundamental da forma:

$$v(t) = V_1^{\text{Re}} \cos(\omega t) - V_1^{\text{Im}} \sin(\omega t), \quad (2.54)$$

$$i(t) = I_1^{\text{Re}} \cos(\omega t) - I_1^{\text{Im}} \sin(\omega t), \quad (2.55)$$

$$v_c(t) = V_{c1}^{\text{Re}} \cos(\omega t) - V_{c1}^{\text{Im}} \sin(\omega t), \quad (2.56)$$

$$\begin{aligned} R \left[I_1^{\text{Re}} \cos(\omega t) - I_1^{\text{Im}} \sin(\omega t) \right] + L \frac{d}{dt} \left[I_1^{\text{Re}} \cos(\omega t) - I_1^{\text{Im}} \sin(\omega t) \right] + \\ + \left[V_{c1}^{\text{Re}} \cos(\omega t) - V_{c1}^{\text{Im}} \sin(\omega t) \right] = V_1^{\text{Re}} \cos(\omega t) - V_1^{\text{Im}} \sin(\omega t), \end{aligned} \quad (2.57)$$

$$\begin{aligned} RI_1^{\text{Re}} \cos(\omega t) - RI_1^{\text{Im}} \sin(\omega t) + L \frac{dI_1^{\text{Re}}}{dt} \cos(\omega t) - \omega LI_1^{\text{Re}} \sin(\omega t) - L \frac{dI_1^{\text{Im}}}{dt} \sin(\omega t) \\ - \omega LI_1^{\text{Im}} \cos(\omega t) + V_{c1}^{\text{Re}} \cos(\omega t) - V_{c1}^{\text{Im}} \sin(\omega t) = V_1^{\text{Re}} \cos(\omega t) - V_1^{\text{Im}} \sin(\omega t), \end{aligned} \quad (2.58)$$

$$\begin{aligned} \left[RI_1^{\text{Re}} + L \frac{dI_1^{\text{Re}}}{dt} - \omega LI_1^{\text{Im}} + V_{c1}^{\text{Re}} - V_1^{\text{Re}} \right] \cos(\omega t) \\ + \left[-RI_1^{\text{Im}} - \omega LI_1^{\text{Re}} - L \frac{dI_1^{\text{Im}}}{dt} - V_{c1}^{\text{Im}} + V_1^{\text{Im}} \right] \sin(\omega t) = 0, \end{aligned} \quad (2.59)$$

$$RI_1^{\text{Re}} + L \frac{dI_1^{\text{Re}}}{dt} - \omega LI_1^{\text{Im}} + V_{c1}^{\text{Re}} - V_1^{\text{Re}} = 0, \quad (2.60)$$

$$-RI_1^{\text{Im}} - \omega LI_1^{\text{Re}} - L \frac{dI_1^{\text{Im}}}{dt} - V_{c1}^{\text{Im}} + V_1^{\text{Im}} = 0, \quad (2.61)$$

$$I_1^{\text{Re}} \cos(\omega t) - I_1^{\text{Im}} \sin(\omega t) = C \frac{d}{dt} \left[V_{c1}^{\text{Re}} \cos(\omega t) - V_{c1}^{\text{Im}} \sin(\omega t) \right], \quad (2.62)$$

$$\begin{aligned} I_1^{\text{Re}} \cos(\omega t) - I_1^{\text{Im}} \sin(\omega t) = C \frac{dV_{c1}^{\text{Re}}}{dt} \cos(\omega t) - \omega CV_{c1}^{\text{Re}} \sin(\omega t) \\ - C \frac{dV_{c1}^{\text{Im}}}{dt} \sin(\omega t) - \omega CV_{c1}^{\text{Im}} \cos(\omega t), \end{aligned} \quad (2.63)$$

$$\left[I_1^{\text{Re}} - C \frac{dV_{c1}^{\text{Re}}}{dt} + \omega CV_{c1}^{\text{Im}} \right] \cos(\omega t) + \left[-I_1^{\text{Im}} + \omega CV_{c1}^{\text{Re}} + C \frac{dV_{c1}^{\text{Im}}}{dt} \right] \sin(\omega t) = 0, \quad (2.64)$$

$$I_1^{\text{Re}} - C \frac{dV_{c1}^{\text{Re}}}{dt} + \omega C V_{c1}^{\text{Im}} = 0, \quad (2.65)$$

$$-I_1^{\text{Im}} + \omega C V_{c1}^{\text{Re}} + C \frac{dV_{c1}^{\text{Im}}}{dt} = 0. \quad (2.66)$$

Portanto, as equações do sistema escritas em termos dos fasores dinâmicos:

$$\begin{cases} L\dot{I}_1^{\text{Re}} + RI_1^{\text{Re}} - \omega LI_1^{\text{Im}} + V_{c1}^{\text{Re}} - V_1^{\text{Re}} = 0; \\ L\dot{I}_1^{\text{Im}} + \omega LI_1^{\text{Re}} + RI_1^{\text{Im}} + V_{c1}^{\text{Im}} - V_1^{\text{Im}} = 0; \\ C\dot{V}_{c1}^{\text{Re}} - I_1^{\text{Re}} - \omega C V_{c1}^{\text{Im}} = 0; \\ C\dot{V}_{c1}^{\text{Im}} - I_1^{\text{Im}} + \omega C V_{c1}^{\text{Re}} = 0. \end{cases} \quad (2.67)$$

considerando-se:

$$u(t) = v(t), \quad y(t) = i(t), \quad (2.68)$$

pode-se modelar o sistema (2.67) em espaço-estado [KUNDUR 1994] da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_1^{\text{Re}}}{dt} \\ \frac{dI_1^{\text{Im}}}{dt} \\ \frac{dV_{c1}^{\text{Re}}}{dt} \\ \frac{dV_{c1}^{\text{Im}}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & -\frac{1}{L} & 0 \\ \omega & -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 & 0 & \omega \\ 0 & \frac{1}{C} & -\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1^{\text{Re}} \\ I_1^{\text{Im}} \\ V_{c1}^{\text{Re}} \\ V_{c1}^{\text{Im}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^{\text{Re}} \\ V_1^{\text{Im}} \end{bmatrix}, \quad (2.69)$$

$$\begin{bmatrix} Y^{\text{Re}} \\ Y^{\text{Im}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1^{\text{Re}} \\ I_1^{\text{Im}} \\ V_{c1}^{\text{Re}} \\ V_{c1}^{\text{Im}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^{\text{Re}} \\ V_1^{\text{Im}} \end{bmatrix}. \quad (2.70)$$

Considerando condições iniciais nulas, a Transformada de Laplace da equação diferencial linear (2.53) é dada por:

$$I_1(s) = V_{c1}(s) C s. \quad (2.71)$$

A Transformada de Laplace da mesma equação escrita em termos de fasores dinâmicos é a seguinte:

$$\mathcal{L}\{\tilde{I}_1(t)\} = \mathcal{L}\left\{C \frac{d\tilde{V}_{c1}(t)}{dt} + j\omega C \tilde{V}_{c1}(t)\right\}, \quad (2.72)$$

$$\tilde{I}_1(s) = \tilde{V}_{c1}(s) C[s + j\omega]. \quad (2.73)$$

Observa-se que (2.73) apresenta um deslocamento em s da frequência fundamental (ω) em relação à (2.71).

2.5 Simulação de RLC Modelado por Fasores Dinâmicos

Para exemplificar o comportamento do circuito RLC (Figura 2.5) modelado por fasores dinâmicos, as equações (2.69) e (2.70) foram implementadas no MATLAB e resolvidas para uma entrada senoidal em $t=0$. A Tabela 2.1 mostra os valores dos parâmetros e dados para esta simulação.

Tabela 2.1 – Valores dos parâmetros e dados para simulação do RLC.

Δt [s]	f [Hz]	R [Ω]	L [H]	C [F]	$v(t)$ [V]
10 μ	60	100	1	1 μ	$\cos(\omega t)$

O fasor dinâmico da tensão da fonte ideal é dado por:

$$v(t) = V_1^{\text{Re}}(t) \cos(\omega t) - V_1^{\text{Im}}(t) \sin(\omega t). \quad (2.74)$$

Observa-se que se $V_1^{\text{Re}} = 1$ e $V_1^{\text{Im}} = 0$, teremos:

$$v(t) = 1 \cos(\omega t) - 0 \sin(\omega t) = \cos(\omega t). \quad (2.75)$$

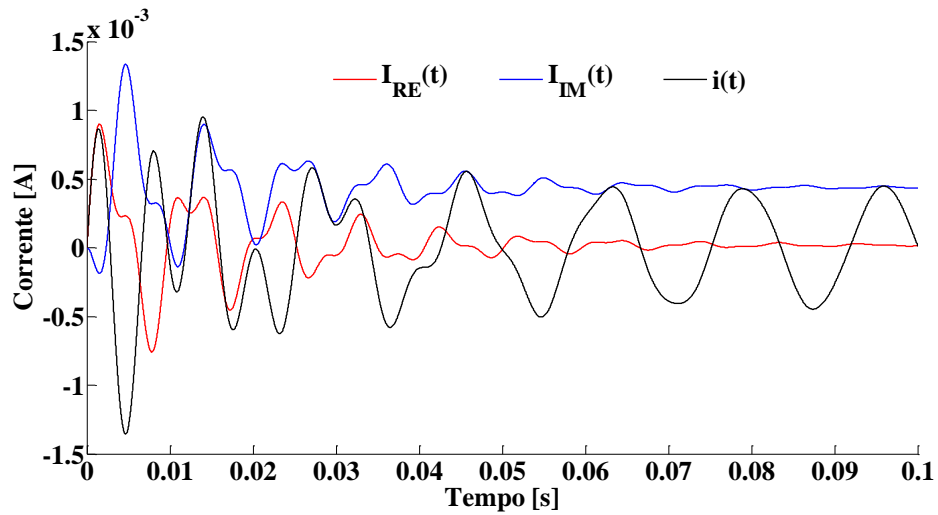


Figura 2.6 - Corrente i e seus FDs no circuito RLC simulado no MATLAB.

A resposta do sistema:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & -\frac{1}{L} & 0 \\ -\omega & -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 & 0 & \omega \\ 0 & \frac{1}{C} & -\omega & 0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (2.76)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

é mostrada na Figura 2.6, onde estão as componentes real e imaginária da corrente no indutor, ou seja, os fasores dinâmicos de $i(t)$. É importante observar que os fasores dinâmicos são funções do tempo e a corrente $i(t)$ é calculada utilizando:

$$i(t) = I_1^{\text{Re}}(t) \cos(\omega t) - I_1^{\text{Im}}(t) \sin(\omega t). \quad (2.77)$$

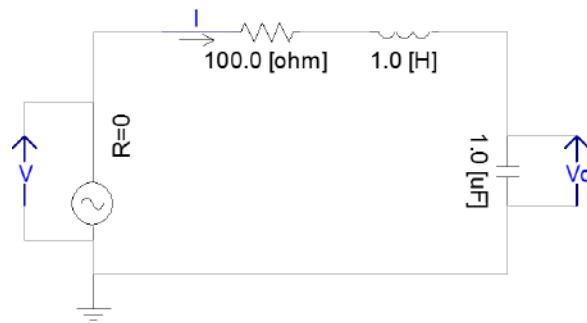


Figura 2.7 - RLC série e uma fonte de tensão ideal no PSCAD.

Para validar os resultados encontrados no MATLAB, o mesmo sistema RLC foi simulado no Programa PSCAD/EMTDC com os mesmos parâmetros e dados da Tabela 2.1 conforme mostrado na Figura 2.7.

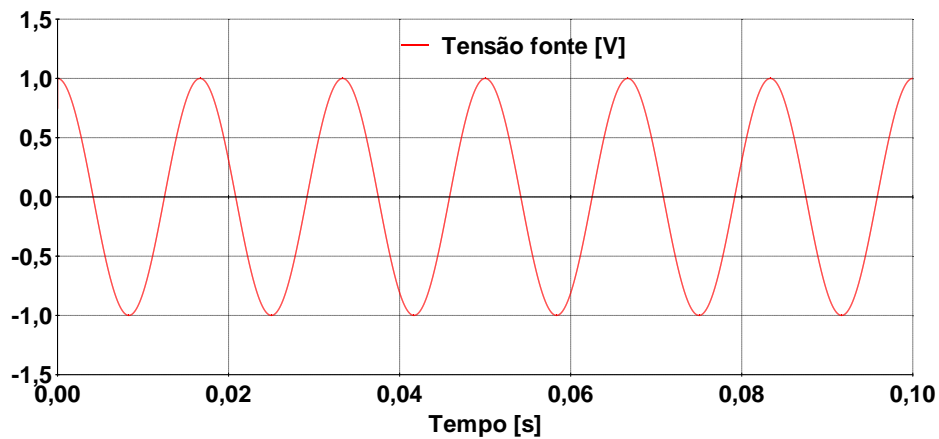


Figura 2.8 – Tensão da fonte ideal do circuito RLC simulado no PSCAD.

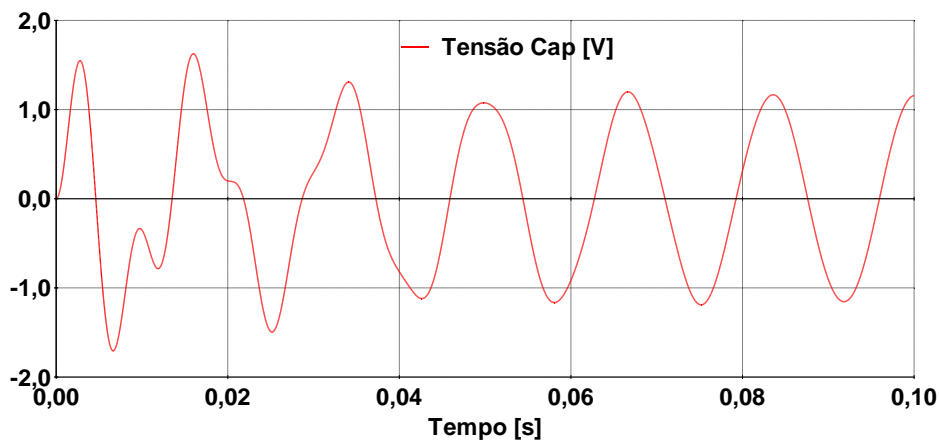


Figura 2.9 – Tensão no capacitor do circuito RLC simulado no PSCAD.

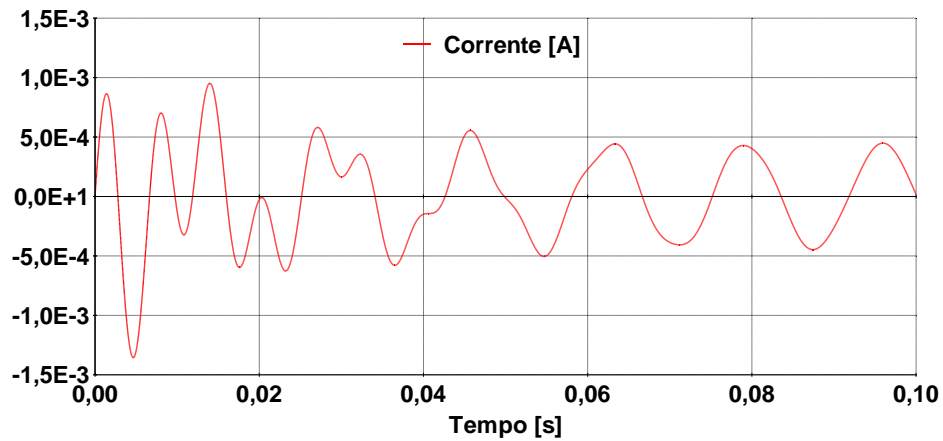


Figura 2.10 – Corrente no indutor do circuito RLC simulado no PSCAD.

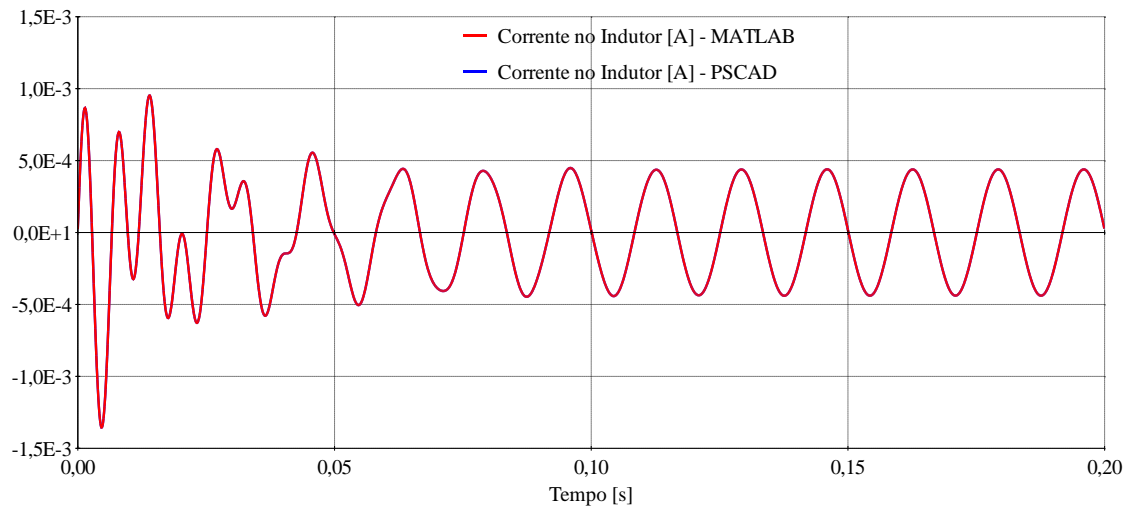


Figura 2.11 – Corrente no indutor – Comparação MATLAB e PSCAD.

Na Figura 2.8 a Figura 2.10 são mostradas respectivamente a tensão aplicada (fonte), a tensão no capacitor e a corrente no indutor para a simulação no PSCAD/EMTDC. Na Figura 2.11 é feita a comparação das simulações no MATLAB e no PSCAD mostrando que ambos resultados são idênticos.

Capítulo 3

Modelos de Acompanhamento de Fasores Dinâmicos

3.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada a principal metodologia proposta neste trabalho que consiste na aplicação do método trapezoidal aos elementos básicos da rede ca (resistência, indutância, capacitância e linha de transmissão com parâmetros distribuídos) modelados como fasores dinâmicos resultando em modelos de acompanhamento. É apresentado o desenvolvimento matemático das equações necessárias para posterior implementação de um algoritmo básico no MATLAB para solução de transitórios da sequência positiva de uma rede genérica. Assim, os MAFD (Modelos de Acompanhamento de Fasores Dinâmicos) constituem o núcleo central do simulador proposto. Como o objetivo de simplificar a escrita das equações trapezoidais, é definida a seguinte regra: uma equação diferencial ordinária qualquer

$$\frac{dx}{dt} = y, \quad (3.1)$$

pode ser escrita em função de Δt pela aproximação (ou regra) trapezoidal da integral da seguinte forma:

$$x(t) - x(t - \Delta t) = \left[\frac{y(t) + y(t - \Delta t)}{2} \right] \Delta t. \quad (3.2)$$

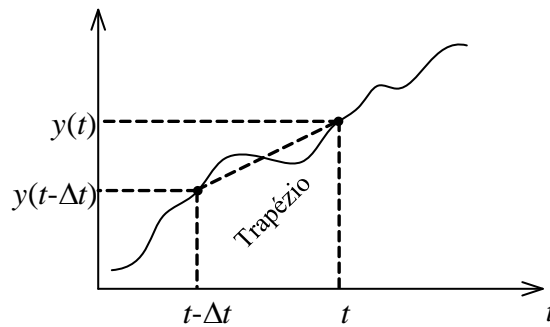


Figura 3.1 - Área do trapézio na aproximação da integral.

Em (3.2) $x(t) - x(t - \Delta t)$ é igual à área do trapézio indicada no plano $y(t)$ x t da Figura 3.1 e podemos escrever:

$$\frac{y(t) + y(t - \Delta t)}{2} = \frac{x(t) - x(t - \Delta t)}{\Delta t}. \quad (3.3)$$

Portanto, tem-se como regra prática que, para se escrever a equação trapezoidal de uma equação diferencial ordinária qualquer, basta substituir as variáveis funções do tempo por $[f(t) + f(t - \Delta t)]/2$ e as derivadas por $[f(t) - f(t - \Delta t)]/\Delta t$.

As características de baixa distorção e estabilidade numérica da integração trapezoidal aplicadas a sistemas elétricos convencionais são notoriamente conhecidas [DOMMEL 1986], [SOLODOVNIK 1998]. Contudo, em alguns tipos de simulação podem ocorrer oscilações numéricas sustentadas, como por exemplo no caso de simulações envolvendo tensão em um indutor após interrupção brusca na corrente do mesmo, ou envolvendo corrente em um capacitor após alteração brusca da tensão. Nestas situações, é possível a aplicação de técnicas específicas [MARTÍ 1989], [GAO 2003], [HONG 2009] para amortecimento destas oscilações numéricas, como por exemplo a utilização da regra *Backward Euler* durante dois $\Delta t/2$ passos de integração, conforme [MARTÍ 1989]. Também é possível utilizar técnicas de extrapolação para resolver os problemas de oscilação numérica [KUFFEL 1997], conforme utilizado no PSCAD.

Na próxima seção é apresentado o desenvolvimento matemático dos MAFD dos elementos da rede são lineares. Por questão de simplicidade de notação considerou-se as tensões e correntes representadas apenas por fasores dinâmicos de frequência fundamental, que permitem a simulação de transitórios sem perda de precisão para redes elétricas compostas apenas por elementos lineares. Quando houver a presença de elementos não lineares, haverá a presença de componentes harmônicas em regime permanente e, por consequência, haverá fasores dinâmicos harmônicos. Os MAFD para estes fasores harmônicos serão análogos aos da frequência fundamental ω_0 , considerando, no entanto, que a frequência ω dos modelos são iguais às frequências das ordens harmônicas que se deseja considerar ($h.\omega_0$).

Mesmo existindo componentes harmônicas no sistema, será visto que modelos de frequência fundamental podem ser utilizados na prática em alguns estudos de desempenho dinâmico de equipamentos chaveados, sem perda de precisão.

Nos casos em que se desejar considerar a dinâmica dos fasores dinâmicos harmônicos, pode se usar a superposição para modelar a parte linear da rede como um conjunto de redes desacopladas entre si, cada qual com a frequência ω correspondente à ordem harmônica. Esta técnica será vista mais adiante na modelagem de elementos não-lineares e no uso do método *Quasi-Newton*.

3.2 Equações para resistência

A equação algébrica que descreve o comportamento elétrico em função do tempo de um resistor conectado entre dois nós genéricos k e m (Lei de Ohm), conforme indicado na Figura 3.2, é dada por:

$$i_{km}(t) = \frac{v_{km}(t)}{R}. \quad (3.4)$$

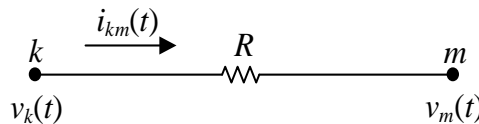


Figura 3.2 – Resistência entre dois nós genéricos k e m .

Os fasores dinâmicos das grandezas ca (tensão e corrente no resistor) são:

$$v_{km}(t) = V_{kmRe}(t) \cos(\omega t) - V_{kmIm}(t) \text{sen}(\omega t), \quad (3.5)$$

$$i_{km}(t) = I_{kmRe}(t) \cos(\omega t) - I_{kmIm}(t) \text{sen}(\omega t), \quad (3.6)$$

onde,

$$v_{km}(t) = v_k(t) - v_m(t). \quad (3.7)$$

Substituindo-se (3.5) e (3.6) em (3.4), teremos:

$$I_{km\text{Re}}(t)\cos(\omega t) - I_{km\text{Im}}(t)\sin(\omega t) = \frac{V_{km\text{Re}}(t)\cos(\omega t) - V_{km\text{Im}}(t)\sin(\omega t)}{R}. \quad (3.8)$$

Igualando-se os termos de $\sin(\omega t)$ e $\cos(\omega t)$ em ambos os lados de (3.8), obtém-se as equações em função de fasores dinâmicos:

$$I_{km\text{Re}}(t) = \frac{V_{km\text{Re}}(t)}{R}, \quad (3.9)$$

$$I_{km\text{Im}}(t) = \frac{V_{km\text{Im}}(t)}{R}. \quad (3.10)$$

Como as relações entre tensão e corrente para a resistência não envolve equação diferencial, não se aplica a regra trapezoidal neste caso. Escrevendo (3.9) e (3.10) em forma matricial:

$$\begin{bmatrix} I_{km\text{Re}}(t) \\ I_{km\text{Im}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{km\text{Re}}(t) \\ V_{km\text{Im}}(t) \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

Observa-se que em (3.11) a matriz que relaciona os fasores dinâmicos de tensão e corrente no resistor é uma matriz diagonal, ou seja, não há acoplamento entre as componentes real e imaginária. A Figura 3.3 mostra o circuito equivalente da resistência.

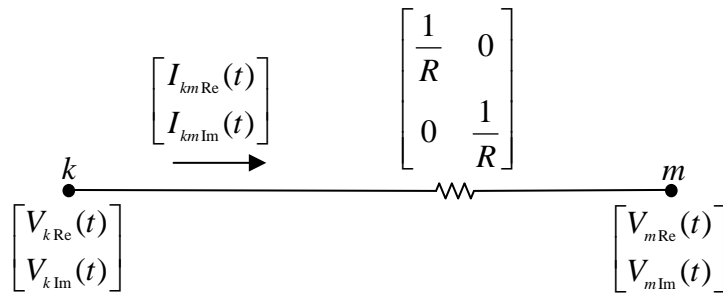


Figura 3.3 – Circuito equivalente de FDs da resistência.

3.3 Equações para Indutância

A equação diferencial ordinária que descreve o comportamento elétrico de um indutor conectado entre dois nós genéricos k e m em função do tempo, conforme indicado na Figura 3.4, é dada por:

$$v_{km}(t) - L \frac{di_{km}(t)}{dt} = 0. \quad (3.12)$$

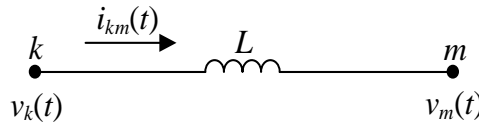


Figura 3.4 - Indutância entre dois nós genéricos k e m .

Os fasores dinâmicos das grandezas ca (tensão e corrente no elemento) são os seguintes:

$$v_{km}(t) = V_{kmRe}(t) \cos(\omega t) - V_{kmIm}(t) \sin(\omega t), \quad (3.13)$$

$$i_{km}(t) = I_{kmRe}(t) \cos(\omega t) - I_{kmIm}(t) \sin(\omega t), \quad (3.14)$$

onde,

$$v_{km}(t) = v_k(t) - v_m(t). \quad (3.15)$$

Substituindo-se (3.13) e (3.14) em (3.12):

$$\begin{aligned} V_{kmRe}(t) \cos(\omega t) - V_{kmIm}(t) \sin(\omega t) &= L \frac{dI_{kmRe}(t)}{dt} \cos(\omega t) - \omega L I_{kmRe}(t) \sin(\omega t) \\ &\quad - L \frac{dI_{kmIm}(t)}{dt} \sin(\omega t) - \omega L I_{kmIm}(t) \cos(\omega t). \end{aligned} \quad (3.16)$$

Igualando-se os termos de $\sin(\omega t)$ e $\cos(\omega t)$ em ambos os lados de (3.16), obtém-se as equações em função de fasores dinâmicos:

$$V_{kmRe}(t) = L \frac{dI_{kmRe}(t)}{dt} - \omega L I_{kmIm}(t), \quad (3.17)$$

$$V_{kmIm}(t) = L \frac{dI_{kmIm}(t)}{dt} + \omega L I_{kmRe}(t). \quad (3.18)$$

Utilizando-se a regra trapezoidal em (3.17) e (3.18) obtém-se as equações trapezoidais dos fasores dinâmicos. De (3.17) tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{V_{kmRe}(t) + V_{kmRe}(t - \Delta t)}{2} = L \left[\frac{I_{kmRe}(t) - I_{kmRe}(t - \Delta t)}{\Delta t} \right] \\ - \omega L \left[\frac{I_{kmIm}(t) + I_{kmIm}(t - \Delta t)}{2} \right], \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} \frac{V_{kmRe}(t)}{2} + \frac{V_{kmRe}(t - \Delta t)}{2} = \frac{LI_{kmRe}(t)}{\Delta t} - \frac{LI_{kmRe}(t - \Delta t)}{\Delta t} \\ - \frac{\omega LI_{kmIm}(t)}{2} - \frac{\omega LI_{kmIm}(t - \Delta t)}{2}, \end{aligned} \quad (3.20)$$

que podem ser reescritas como:

$$\begin{aligned} I_{kmRe}(t) = \frac{\Delta t V_{kmRe}(t)}{2L} + \frac{\Delta t \omega I_{kmIm}(t)}{2} + \frac{\Delta t V_{kmRe}(t - \Delta t)}{2L} \\ + I_{kmRe}(t - \Delta t) + \frac{\omega \Delta t I_{kmIm}(t - \Delta t)}{2}, \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} I_{kmRe}(t) = \frac{\Delta t}{2L} [V_{kRe}(t) - V_{mRe}(t)] + \frac{\omega \Delta t}{2} I_{kmIm}(t) \\ + \frac{\Delta t}{2L} [V_{kRe}(t - \Delta t) - V_{mRe}(t - \Delta t)] + I_{kmRe}(t - \Delta t) + \frac{\omega \Delta t}{2} I_{kmIm}(t - \Delta t). \end{aligned} \quad (3.22)$$

E de (3.18),

$$\begin{aligned} \frac{V_{kmIm}(t) + V_{kmIm}(t - \Delta t)}{2} = L \left[\frac{I_{kmIm}(t) - I_{kmIm}(t - \Delta t)}{\Delta t} \right] \\ + \omega L \left[\frac{I_{kmRe}(t) + I_{kmRe}(t - \Delta t)}{2} \right], \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} \frac{V_{kmIm}(t)}{2} + \frac{V_{kmIm}(t - \Delta t)}{2} = \frac{LI_{kmIm}(t)}{\Delta t} - \frac{LI_{kmIm}(t - \Delta t)}{\Delta t} \\ + \frac{\omega LI_{kmRe}(t)}{2} + \frac{\omega LI_{kmRe}(t - \Delta t)}{2}, \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned}
I_{km\text{Im}}(t) = & \frac{\Delta t V_{km\text{Im}}(t)}{2L} - \frac{\Delta t \omega I_{km\text{Re}}(t)}{2} + \frac{\Delta t V_{km\text{Im}}(t - \Delta t)}{2L} \\
& + I_{km\text{Im}}(t - \Delta t) - \frac{\omega \Delta t I_{km\text{Re}}(t - \Delta t)}{2},
\end{aligned} \tag{3.25}$$

$$\begin{aligned}
I_{km\text{Im}}(t) = & \frac{\Delta t}{2L} [V_{k\text{Im}}(t) - V_{m\text{Im}}(t)] - \frac{\omega \Delta t}{2} I_{km\text{Re}}(t) \\
& + \frac{\Delta t}{2L} [V_{k\text{Im}}(t - \Delta t) - V_{m\text{Im}}(t - \Delta t)] + I_{km\text{Im}}(t - \Delta t) - \frac{\omega \Delta t}{2} I_{km\text{Re}}(t - \Delta t).
\end{aligned} \tag{3.26}$$

Escrevendo (3.22) e (3.26) em forma matricial:

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} 1 & -\frac{\omega \Delta t}{2} \\ \frac{\omega \Delta t}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{km\text{Re}}(t) \\ I_{km\text{Im}}(t) \end{bmatrix} = \\
& \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2L} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t}{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{k\text{Re}}(t) \\ V_{k\text{Im}}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2L} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t}{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m\text{Re}}(t) \\ V_{m\text{Im}}(t) \end{bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} 1 & \frac{\omega \Delta t}{2} \\ -\frac{\omega \Delta t}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{km\text{Re}}(t - \Delta t) \\ I_{km\text{Im}}(t - \Delta t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2L} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t}{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{k\text{Re}}(t - \Delta t) \\ V_{k\text{Im}}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \\
& - \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2L} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t}{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m\text{Re}}(t - \Delta t) \\ V_{m\text{Im}}(t - \Delta t) \end{bmatrix},
\end{aligned} \tag{3.27}$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} I_{kmRe}(t) \\ I_{kmIm}(t) \end{bmatrix} &= k_1 \begin{bmatrix} 1 & \frac{\omega\Delta t}{2} \\ -\frac{\omega\Delta t}{2} & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} V_{kRe}(t) \\ V_{kIm}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{mRe}(t) \\ V_{mIm}(t) \end{bmatrix} \right) \\
&+ k_1 \begin{bmatrix} 1 & \frac{\omega\Delta t}{2} \\ -\frac{\omega\Delta t}{2} & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} V_{kRe}(t-\Delta t) \\ V_{kIm}(t-\Delta t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{mRe}(t-\Delta t) \\ V_{mIm}(t-\Delta t) \end{bmatrix} \right) \\
&+ \begin{bmatrix} \frac{-\omega^2\Delta t^2 + 4}{\omega^2\Delta t^2 + 4} & \frac{4\omega\Delta t}{\omega^2\Delta t^2 + 4} \\ \frac{-4\omega\Delta t}{\omega^2\Delta t^2 + 4} & \frac{-\omega^2\Delta t^2 + 4}{\omega^2\Delta t^2 + 4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{kmRe}(t-\Delta t) \\ I_{kmIm}(t-\Delta t) \end{bmatrix},
\end{aligned} \tag{3.28}$$

onde,

$$k_1 = \frac{2\Delta t}{L(\omega^2\Delta t^2 + 4)}. \tag{3.29}$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} I'_{kmRe}(t-\Delta t) \\ I'_{kmIm}(t-\Delta t) \end{bmatrix} &= k_1 \begin{bmatrix} 1 & \frac{\omega\Delta t}{2} \\ -\frac{\omega\Delta t}{2} & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} V_{kRe}(t-\Delta t) \\ V_{kIm}(t-\Delta t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{mRe}(t-\Delta t) \\ V_{mIm}(t-\Delta t) \end{bmatrix} \right) \\
&+ \begin{bmatrix} \frac{-\omega^2\Delta t^2 + 4}{\omega^2\Delta t^2 + 4} & \frac{4\omega\Delta t}{\omega^2\Delta t^2 + 4} \\ \frac{-4\omega\Delta t}{\omega^2\Delta t^2 + 4} & \frac{-\omega^2\Delta t^2 + 4}{\omega^2\Delta t^2 + 4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{kmRe}(t-\Delta t) \\ I_{kmIm}(t-\Delta t) \end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{3.30}$$

Observa-se em (3.28) que a matriz que relaciona os fasores dinâmicos de tensão e corrente no indutor possui termos não-nulos fora da diagonal principal, o que indica acoplamento entre as componentes real e imaginária. Observa-se ainda que os termos que dependem dos valores das variáveis (tensões e correntes) no passo anterior ($t-\Delta t$) constituem o termo histórico (3.30).

A Figura 3.5 mostra o circuito equivalente da indutância, que é o modelo de acompanhamento de fasores dinâmicos. Este modelo de acompanhamento é composto por uma matriz de condutâncias em paralelo com um vetor de fonte de corrente que condensa todas as informações passadas, para que se possa atualizar o valor das tensões e correntes no instante t atual.

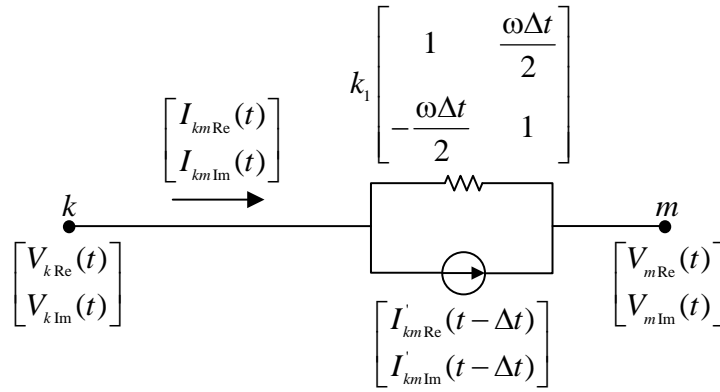


Figura 3.5 - Circuito equivalente da indutância.

3.4 Equações para Capacitância

A equação diferencial ordinária que descreve o comportamento elétrico de um capacitor conectado entre dois nós genéricos k e m em função do tempo, conforme indicado na Figura 3.6, é dada por:

$$i_{km}(t) - C \frac{dv_{km}(t)}{dt} = 0. \quad (3.31)$$

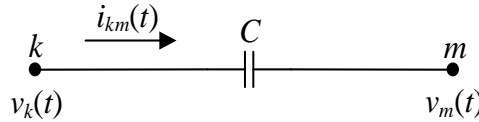


Figura 3.6 - Capacitância entre dois nós genéricos k e m.

Os fasores dinâmicos das grandezas v_{km} (queda de tensão e corrente no elemento) são os seguintes:

$$v_{km}(t) = V_{kmRe}(t) \cos(\omega t) - V_{kmIm}(t) \sin(\omega t), \quad (3.32)$$

$$i_{km}(t) = I_{kmRe}(t) \cos(\omega t) - I_{kmIm}(t) \sin(\omega t), \quad (3.33)$$

onde,

$$v_{km}(t) = v_k(t) - v_m(t). \quad (3.34)$$

Substituindo-se (3.32) e (3.33) em (3.31):

$$\begin{aligned} I_{kmRe}(t)\cos(\omega t) - I_{kmIm}(t)\sin(\omega t) = & C \frac{dV_{kmRe}(t)}{dt} \cos(\omega t) - \omega CV_{kmRe}(t)\sin(\omega t) \\ & - C \frac{dV_{kmIm}(t)}{dt} \sin(\omega t) - \omega CV_{kmIm}(t)\cos(\omega t). \end{aligned} \quad (3.35)$$

Igualando-se os termos de $\sin(\omega t)$ e $\cos(\omega t)$ em ambos os lados de (3.16), tem-se as equações em função de fasores dinâmicos:

$$I_{kmRe}(t) = C \frac{dV_{kmRe}(t)}{dt} - \omega CV_{kmIm}(t), \quad (3.36)$$

$$I_{kmIm}(t) = C \frac{dV_{kmIm}(t)}{dt} + \omega CV_{kmRe}(t). \quad (3.37)$$

Utilizando-se a regra trapezoidal em (3.36) e (3.37) obtém-se as equações trapezoidais dos fasores dinâmicos. De (3.36):

$$\begin{aligned} \frac{I_{kmRe}(t) + I_{kmRe}(t - \Delta t)}{2} = & C \left[\frac{V_{kmRe}(t) - V_{kmRe}(t - \Delta t)}{\Delta t} \right] \\ & - \omega C \left[\frac{V_{kmIm}(t) + V_{kmIm}(t - \Delta t)}{2} \right], \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned} \frac{I_{kmRe}(t)}{2} + \frac{I_{kmRe}(t - \Delta t)}{2} = & \frac{CV_{kmRe}(t)}{\Delta t} - \frac{CV_{kmRe}(t - \Delta t)}{\Delta t} \\ & - \frac{\omega CV_{kmIm}(t)}{2} - \frac{\omega CV_{kmIm}(t - \Delta t)}{2}, \end{aligned} \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} I_{kmRe}(t) = & \frac{2C}{\Delta t} V_{kmRe}(t) - \omega CV_{kmIm}(t) - \frac{2C}{\Delta t} [V_{kRe}(t - \Delta t) - V_{mRe}(t - \Delta t)] \\ & - I_{kmRe}(t - \Delta t) - \omega C [V_{kIm}(t - \Delta t) - V_{mIm}(t - \Delta t)]. \end{aligned} \quad (3.40)$$

E de (3.37):

$$\begin{aligned} \frac{I_{km\text{Im}}(t) + I_{km\text{Im}}(t - \Delta t)}{2} &= C \left[\frac{V_{km\text{Im}}(t) - V_{km\text{Im}}(t - \Delta t)}{\Delta t} \right] \\ &+ \omega C \left[\frac{V_{km\text{Re}}(t) + V_{km\text{Re}}(t - \Delta t)}{2} \right], \end{aligned} \quad (3.41)$$

$$\begin{aligned} \frac{I_{km\text{Im}}(t)}{2} + \frac{I_{km\text{Im}}(t - \Delta t)}{2} &= \frac{CV_{km\text{Im}}(t)}{\Delta t} - \frac{CV_{km\text{Im}}(t - \Delta t)}{\Delta t} \\ &+ \frac{\omega CV_{km\text{Re}}(t)}{2} + \frac{\omega CV_{km\text{Re}}(t - \Delta t)}{2}, \end{aligned} \quad (3.42)$$

$$\begin{aligned} I_{km\text{Im}}(t) &= \frac{2C}{\Delta t} V_{km\text{Im}}(t) + \omega CV_{km\text{Re}}(t) - \frac{2C}{\Delta t} [V_{k\text{Im}}(t - \Delta t) - V_{m\text{Im}}(t - \Delta t)] \\ &- I_{km\text{Im}}(t - \Delta t) + \omega C [V_{k\text{Re}}(t - \Delta t) - V_{m\text{Re}}(t - \Delta t)]. \end{aligned} \quad (3.43)$$

Escrevendo (3.40) e (3.43) em forma matricial:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_{km\text{Re}}(t) \\ I_{km\text{Im}}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{2C}{\Delta t} & -\omega C \\ \omega C & \frac{2C}{\Delta t} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} V_{k\text{Re}}(t) \\ V_{k\text{Im}}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{m\text{Re}}(t) \\ V_{m\text{Im}}(t) \end{bmatrix} \right) \\ &- \begin{bmatrix} \frac{2C}{\Delta t} & \omega C \\ -\omega C & \frac{2C}{\Delta t} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} V_{k\text{Re}}(t - \Delta t) \\ V_{k\text{Im}}(t - \Delta t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{m\text{Re}}(t - \Delta t) \\ V_{m\text{Im}}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \right) \\ &- \begin{bmatrix} I_{km\text{Re}}(t - \Delta t) \\ I_{km\text{Im}}(t - \Delta t) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.44)$$

Observa-se em (3.44) que a matriz que relaciona os fasores dinâmicos de tensão e corrente no capacitor possui termos não-nulos fora da diagonal principal, o que indica acoplamento entre as componentes real e imaginária. Observa-se ainda que os termos que dependem dos valores das variáveis (tensões e correntes) no passo anterior ($t - \Delta t$) constituem o termo histórico:

$$\begin{bmatrix} I'_{kmRe}(t-\Delta t) \\ I'_{kmIm}(t-\Delta t) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{2C}{\Delta t} & \omega C \\ -\omega C & \frac{2C}{\Delta t} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} V_{kRe}(t-\Delta t) \\ V_{kIm}(t-\Delta t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{mRe}(t-\Delta t) \\ V_{mIm}(t-\Delta t) \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} I_{kmRe}(t-\Delta t) \\ I_{kmIm}(t-\Delta t) \end{bmatrix}. \quad (3.45)$$

A Figura 3.7 mostra o circuito equivalente da capacitância, que é o modelo de acompanhamento de fasores dinâmicos. Este modelo de acompanhamento é composto por uma matriz de condutâncias em paralelo com um vetor de fonte de corrente que condensa todas as informações passadas, para que se possa atualizar o valor das tensões e correntes no instante t atual.

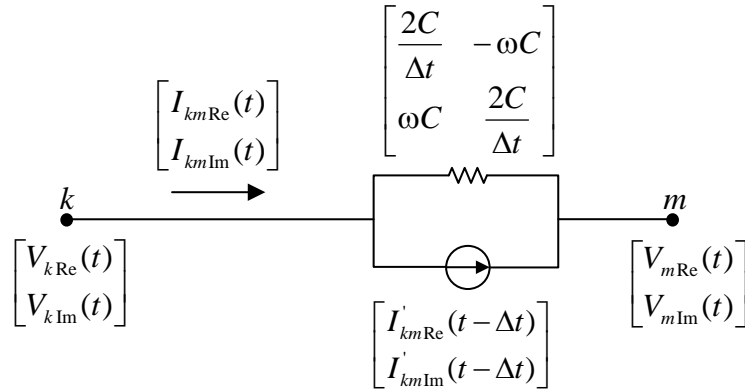


Figura 3.7 - Circuito equivalente da capacitância.

3.5 Equações para Linha de Transmissão Sem Perdas

Neste trabalho considera-se para a linha de transmissão o modelo de parâmetros distribuídos de uma linha sem perdas, também conhecido como modelo “Bergeron”, [BERGERON 1950], [DOMMEL 1969], [DOMMEL 1986], [MANITOBA 1994], [ZANETTA 2003], pois o mesmo atende satisfatoriamente aos objetivos do trabalho. Uma das vantagens da utilização deste modelo é a redução do tempo de simulação, quando comparado com modelos de linha mais precisos que consideram a dependência dos parâmetros com a frequência utilizando convolução numérica. [SILVA 2016]. As equações que relacionam tensão e corrente entre dois nós genéricos k e m de uma determinada linha de transmissão, mostrada na Figura 3.8 são dadas por:

$$v_k(t-\tau) + Zi_{km}(t-\tau) = v_m(t) - Zi_{mk}(t), \quad (3.46)$$

$$v_m(t-\tau) + Zi_{mk}(t-\tau) = v_k(t) - Zi_{km}(t), \quad (3.47)$$

onde Z representa a impedância característica ou de surto da linha e τ é o tempo de trânsito da mesma (tempo para a onda percorrer todo o comprimento l da linha).

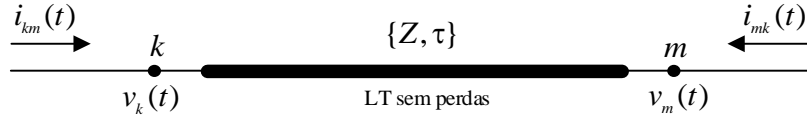


Figura 3.8 – Linha de transmissão sem perdas entre dois nós genéricos k e m .

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (3.48)$$

$$\tau = l\sqrt{LC}. \quad (3.49)$$

Os parâmetros L e C são respectivamente a indutância série e a capacitância paralela por unidade de comprimento da linha. Escrevendo (3.46) em termos dos fasores dinâmicos, tem-se:

$$\begin{aligned} & V_{k\text{Re}}(t-\tau)\cos(\omega t - \omega\tau) - V_{k\text{Im}}(t-\tau)\sin(\omega t - \omega\tau) \\ & + Zi_{km\text{Re}}(t-\tau)\cos(\omega t - \omega\tau) - Zi_{km\text{Im}}(t-\tau)\sin(\omega t - \omega\tau) \\ & = V_{m\text{Re}}(t)\cos(\omega t) - V_{m\text{Im}}(t)\sin(\omega t) - Zi_{mk\text{Re}}(t)\cos(\omega t) + Zi_{mk\text{Im}}(t)\sin(\omega t), \end{aligned} \quad (3.50)$$

$$\begin{aligned} & V_{k\text{Re}}(t-\tau)[\cos(\omega t)\cos(\omega\tau) + \sin(\omega t)\sin(\omega\tau)] \\ & - V_{k\text{Im}}(t-\tau)[\sin(\omega t)\cos(\omega\tau) - \cos(\omega t)\sin(\omega\tau)] \\ & + Zi_{km\text{Re}}(t-\tau)[\cos(\omega t)\cos(\omega\tau) + \sin(\omega t)\sin(\omega\tau)] \\ & - Zi_{km\text{Im}}(t-\tau)[\sin(\omega t)\cos(\omega\tau) - \cos(\omega t)\sin(\omega\tau)] \\ & = V_{m\text{Re}}(t)\cos(\omega t) - V_{m\text{Im}}(t)\sin(\omega t) - Zi_{mk\text{Re}}(t)\cos(\omega t) + Zi_{mk\text{Im}}(t)\sin(\omega t). \end{aligned} \quad (3.51)$$

Igualando-se os termos de $\sin(\omega t)$ e $\cos(\omega t)$ em ambos os lados de (3.51), tem-se a representação da linha de transmissão sem perdas em função de seus fasores dinâmicos:

$$\begin{aligned}
& V_{k\text{Re}}(t-\tau)\cos(\omega\tau) + V_{k\text{Im}}(t-\tau)\text{sen}(\omega\tau) \\
& + ZI_{km\text{Re}}(t-\tau)\cos(\omega\tau) + ZI_{km\text{Im}}(t-\tau)\text{sen}(\omega\tau) \\
& = V_{m\text{Re}}(t) - ZI_{mk\text{Re}}(t),
\end{aligned} \tag{3.52}$$

$$\begin{aligned}
& V_{k\text{Re}}(t-\tau)\text{sen}(\omega\tau) - V_{k\text{Im}}(t-\tau)\cos(\omega\tau) \\
& + ZI_{km\text{Re}}(t-\tau)\text{sen}(\omega\tau) - ZI_{km\text{Im}}(t-\tau)\cos(\omega\tau) \\
& = -V_{m\text{Im}}(t) + ZI_{mk\text{Im}}(t).
\end{aligned} \tag{3.53}$$

Isolando o termo da corrente no tempo t em (3.52) e (3.53), encontra-se os fasores dinâmicos para a corrente I_{mk} :

$$\begin{aligned}
I_{mk\text{Re}}(t) &= \frac{V_{m\text{Re}}(t)}{Z} - V_{k\text{Re}}(t-\tau)\frac{\cos(\omega\tau)}{Z} - I_{km\text{Re}}(t-\tau)\cos(\omega\tau) \\
&\quad - V_{k\text{Im}}(t-\tau)\frac{\text{sen}(\omega\tau)}{Z} - I_{km\text{Im}}(t-\tau)\text{sen}(\omega\tau),
\end{aligned} \tag{3.54}$$

$$\begin{aligned}
I_{mk\text{Im}}(t) &= \frac{V_{m\text{Im}}(t)}{Z} - V_{k\text{Im}}(t-\tau)\frac{\cos(\omega\tau)}{Z} - I_{km\text{Im}}(t-\tau)\cos(\omega\tau) \\
&\quad + V_{k\text{Re}}(t-\tau)\frac{\text{sen}(\omega\tau)}{Z} + I_{km\text{Re}}(t-\tau)\text{sen}(\omega\tau).
\end{aligned} \tag{3.55}$$

Para obter-se as equações dos fasores dinâmicos de (3.47) troca-se k por m e vice-versa em (3.54) e (3.55):

$$\begin{aligned}
I_{km\text{Re}}(t) &= \frac{V_{k\text{Re}}(t)}{Z} - V_{m\text{Re}}(t-\tau)\frac{\cos(\omega\tau)}{Z} - I_{mk\text{Re}}(t-\tau)\cos(\omega\tau) \\
&\quad - V_{m\text{Im}}(t-\tau)\frac{\text{sen}(\omega\tau)}{Z} - I_{mk\text{Im}}(t-\tau)\text{sen}(\omega\tau),
\end{aligned} \tag{3.56}$$

$$\begin{aligned}
I_{km\text{Im}}(t) &= \frac{V_{k\text{Im}}(t)}{Z} - V_{m\text{Im}}(t-\tau)\frac{\cos(\omega\tau)}{Z} - I_{mk\text{Im}}(t-\tau)\cos(\omega\tau) \\
&\quad + V_{m\text{Re}}(t-\tau)\frac{\text{sen}(\omega\tau)}{Z} + I_{mk\text{Re}}(t-\tau)\text{sen}(\omega\tau).
\end{aligned} \tag{3.57}$$

Reescrevendo (3.54), (3.55), (3.56) e (3.57) de maneira simplificada tem-se respectivamente:

$$I_{mk\text{Re}}(t) = \frac{V_{m\text{Re}}(t)}{Z} - b_{m\text{Re}}(t), \tag{3.58}$$

$$I_{mk\text{Im}}(t) = \frac{V_{m\text{Im}}(t)}{Z} - b_{m\text{Im}}(t), \quad (3.59)$$

$$I_{km\text{Re}}(t) = \frac{V_{k\text{Re}}(t)}{Z} - b_{k\text{Re}}(t), \quad (3.60)$$

$$I_{km\text{Im}}(t) = \frac{V_{k\text{Im}}(t)}{Z} - b_{k\text{Im}}(t). \quad (3.61)$$

Os termos indicados como funções de “ (t) ” correspondem aos valores atuais das variáveis. Os termos b_k e b_m , indicados como funções de “ $(t-\tau)$ ”, representam termos com informações do passado (conhecidas). Colocando-se (3.54), (3.55), (3.56) e (3.57) em forma matricial:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_{mk\text{Re}}(t) \\ I_{mk\text{Im}}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{Z} & 0 \\ 0 & \frac{1}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m\text{Re}}(t) \\ V_{m\text{Im}}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} & \frac{\sin(\omega\tau)}{Z} \\ -\frac{\sin(\omega\tau)}{Z} & \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{k\text{Re}}(t-\tau) \\ V_{k\text{Im}}(t-\tau) \end{bmatrix} \\ &\quad - \begin{bmatrix} \cos(\omega\tau) & \sin(\omega\tau) \\ -\sin(\omega\tau) & \cos(\omega\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{km\text{Re}}(t-\tau) \\ I_{km\text{Im}}(t-\tau) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3.62)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_{km\text{Re}}(t) \\ I_{km\text{Im}}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{Z} & 0 \\ 0 & \frac{1}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{k\text{Re}}(t) \\ V_{k\text{Im}}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} & \frac{\sin(\omega\tau)}{Z} \\ -\frac{\sin(\omega\tau)}{Z} & \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m\text{Re}}(t-\tau) \\ V_{m\text{Im}}(t-\tau) \end{bmatrix} \\ &\quad - \begin{bmatrix} \cos(\omega\tau) & \sin(\omega\tau) \\ -\sin(\omega\tau) & \cos(\omega\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{mk\text{Re}}(t-\tau) \\ I_{mk\text{Im}}(t-\tau) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.63)$$

Em (3.62) e (3.63) observa-se que a matriz que relaciona os fasores dinâmicos de tensão e corrente no tempo t atual é uma matriz diagonal, ou seja, não há acoplamento entre as componentes real e imaginária. Os termos com informações conhecidas do passado são respectivamente:

$$\begin{bmatrix} b_{mRe}(t) \\ b_{mIm}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} & \frac{\sin(\omega\tau)}{Z} \\ -\frac{\sin(\omega\tau)}{Z} & \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{kRe}(t-\tau) \\ V_{kIm}(t-\tau) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\omega\tau) & \sin(\omega\tau) \\ -\sin(\omega\tau) & \cos(\omega\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{kmRe}(t-\tau) \\ I_{kmIm}(t-\tau) \end{bmatrix}, \quad (3.64)$$

$$\begin{bmatrix} b_{kRe}(t) \\ b_{kIm}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} & \frac{\sin(\omega\tau)}{Z} \\ -\frac{\sin(\omega\tau)}{Z} & \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{mRe}(t-\tau) \\ V_{mIm}(t-\tau) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\omega\tau) & \sin(\omega\tau) \\ -\sin(\omega\tau) & \cos(\omega\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{mkRe}(t-\tau) \\ I_{mkIm}(t-\tau) \end{bmatrix}. \quad (3.65)$$

Escrevendo as ondas progressivas da linha de transmissão em termos de corrente:

$$\begin{bmatrix} f_{kRe}(t) \\ f_{kIm}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} & \frac{\sin(\omega\tau)}{Z} \\ -\frac{\sin(\omega\tau)}{Z} & \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{kRe}(t) \\ V_{kIm}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\omega\tau) & \sin(\omega\tau) \\ -\sin(\omega\tau) & \cos(\omega\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{kmRe}(t) \\ I_{kmIm}(t) \end{bmatrix}, \quad (3.66)$$

$$\begin{bmatrix} f_{mRe}(t) \\ f_{mIm}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} & \frac{\sin(\omega\tau)}{Z} \\ -\frac{\sin(\omega\tau)}{Z} & \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{mRe}(t) \\ V_{mIm}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\omega\tau) & \sin(\omega\tau) \\ -\sin(\omega\tau) & \cos(\omega\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{mkRe}(t) \\ I_{mkIm}(t) \end{bmatrix}. \quad (3.67)$$

Comparando-se (3.64), (3.65), (3.66) e (3.67):

$$\begin{bmatrix} b_{mRe}(t) \\ b_{mIm}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{kRe}(t-\tau) \\ f_{kIm}(t-\tau) \end{bmatrix}, \quad (3.68)$$

$$\begin{bmatrix} b_{kRe}(t) \\ b_{kIm}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{mRe}(t-\tau) \\ f_{mIm}(t-\tau) \end{bmatrix}. \quad (3.69)$$

A Figura 3.9 e a Figura 3.10 mostram os circuitos equivalentes (partes real e imaginária) para a linha de transmissão sem perdas, que são os modelos de acompanhamento de fasores dinâmicos. Estes são compostos por uma resistência em paralelo com uma fonte de corrente em conexão *shunt* nos terminais k e m . As fontes de corrente b_k e b_m condensam todas as informações passadas, para que se possa atualizar o valor das tensões e correntes no instante t atual.

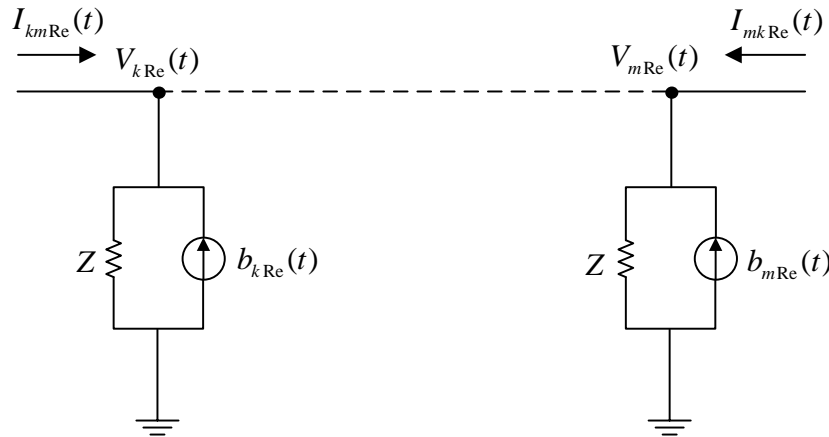


Figura 3.9 – Circuito equivalente da LT sem perdas (parte real).

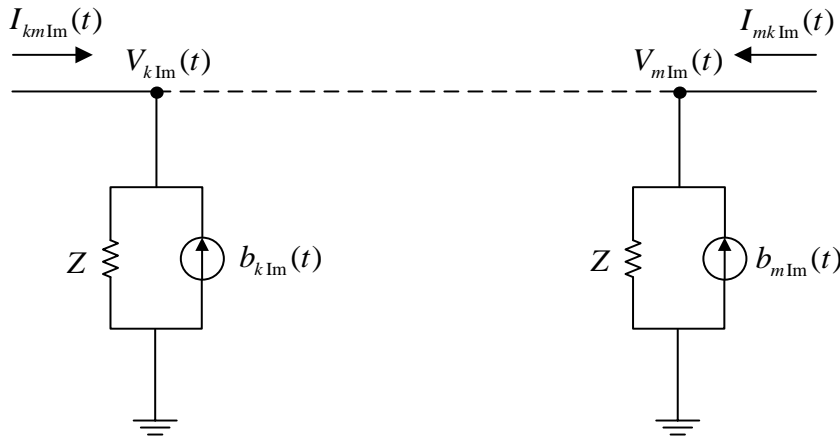


Figura 3.10 - Circuito equivalente da LT sem perdas (parte imaginária).

3.6 Modelo Aproximado para Linha de Transmissão Com Perdas

As perdas de energia nos condutores das linhas de transmissão são dependentes das resistências elétricas distribuídas ao longo de todo o comprimento destes condutores [FUCHS 1979]. Tais resistências, na prática, dependem da frequência (efeito pelicular).

Uma maneira de se considerar as perdas resistivas da linha de transmissão utilizando o modelo de linha sem perda visto anteriormente é apresentado a seguir. Neste modelo aproximado [OLIVEIRA 1983], [MARTÍ 1993] assume-se a resistência constante e concentrada em determinados pontos de um trecho com modelos de linha sem perdas em série com resistências ideais, cuja soma corresponde à resistência total (R) da linha, conforme mostrado na Figura 3.11.

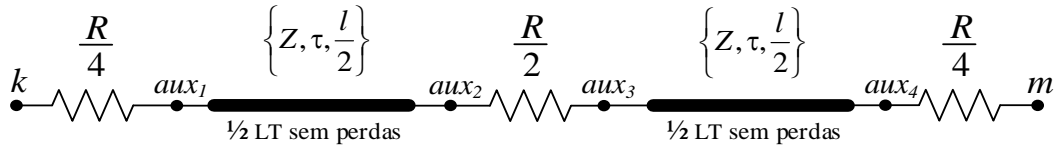


Figura 3.11 – Modelo aproximado para LT com perdas.

Embora existam outros modelos mais precisos e elaborados para a linha de transmissão com parâmetros distribuídos [WATSON 2003], [MORCHED 1999], [MARTÍ 1982], [GUSTAVSEN 2009], [VÁSQUEZ 2001] neste trabalho utilizou-se o modelo de Bergeron por ser um modelo simples que necessita de poucos dados de entrada e atende plenamente aos objetivos propostos para estudos de desempenho dinâmico de redes contendo equipamentos FACTS.

3.7 Considerações importantes sobre o MAFD

Com relação à resistência elétrica presente no MAFD (modelo de acompanhamento de fasores dinâmicos), por exemplo, do indutor ideal (Figura 3.5) é possível demonstrar-se que toda potência consumida neste resistor ao longo de 1 ciclo da frequência nominal é exatamente igual à potência fornecida pela fonte de corrente presente no MAFD em regime permanente. Reescrevendo-se (3.22):

$$\begin{aligned}
 I_{kmRe}(t) &= \frac{\Delta t}{2L} V_{kmRe}(t) + \frac{\omega \Delta t}{2} I_{kmIm}(t) \\
 &+ \frac{\Delta t}{2L} V_{kmRe}(t - \Delta t) + I_{kmRe}(t - \Delta t) + \frac{\omega \Delta t}{2} I_{kmIm}(t - \Delta t).
 \end{aligned}
 \tag{3.70}$$

Em regime permanente, sabe-se que a corrente do passo de tempo anterior $I_{km}(t - \Delta t)$ em (3.70) é exatamente igual à corrente no passo atual $I_{km}(t)$, e a tensão do passo anterior $V_{km}(t - \Delta t)$ é exatamente igual à tensão do passo atual $V_{km}(t)$, logo:

$$I_{kmRe}(t) = \frac{\Delta t}{2L} V_{kmRe}(t) + \frac{\omega \Delta t}{2} I_{kmIm}(t) + \frac{\Delta t}{2L} V_{kmRe}(t) + I_{kmRe}(t) + \frac{\omega \Delta t}{2} I_{kmIm}(t), \quad (3.71)$$

$$\frac{\Delta t}{L} V_{kmRe}(t) + \omega \Delta t I_{kmIm}(t) = 0, \quad (3.72)$$

$$V_{kmRe}(t) = -\omega L I_{kmIm}(t). \quad (3.73)$$

Fazendo-se o mesmo processo para a equação (3.26):

$$I_{kmIm}(t) = \frac{\Delta t}{2L} V_{kmIm}(t) - \frac{\omega \Delta t}{2} I_{kmRe}(t) + \frac{\Delta t}{2L} V_{kmIm}(t) + I_{kmIm}(t) - \frac{\omega \Delta t}{2} I_{kmRe}(t), \quad (3.74)$$

$$\frac{\Delta t}{L} V_{kmIm}(t) - \omega \Delta t I_{kmRe}(t) = 0, \quad (3.75)$$

$$V_{kmIm}(t) = \omega L I_{kmRe}(t). \quad (3.76)$$

Por definição, a potência instantânea dissipada no elemento é:

$$p_{km}(t) = v_{km}(t) i_{km}(t). \quad (3.77)$$

$$p_{km}(t) = [V_{kmRe}(t) \cos(\omega t) - V_{kmIm}(t) \sin(\omega t)] [I_{kmRe}(t) \cos(\omega t) - I_{kmIm}(t) \sin(\omega t)], \quad (3.78)$$

$$p_{km}(t) = V_{kmRe}(t) I_{kmRe}(t) \cos^2(\omega t) + V_{kmIm}(t) I_{kmIm}(t) \sin^2(\omega t) - \cos(\omega t) \sin(\omega t) [V_{kmRe}(t) I_{kmIm}(t) - V_{kmIm}(t) I_{kmRe}(t)]. \quad (3.79)$$

Utilizando identidades trigonométrica:

$$p_{km}(t) = V_{kmRe}(t) I_{kmRe}(t) \left[\frac{1 + \cos(2\omega t)}{2} \right] + V_{kmIm}(t) I_{kmIm}(t) \left[\frac{1 - \cos(2\omega t)}{2} \right] - \frac{\sin(2\omega t)}{2} [V_{kmRe}(t) I_{kmIm}(t) - V_{kmIm}(t) I_{kmRe}(t)], \quad (3.80)$$

$$p_{km}(t) = \cos(2\omega t) \left[\frac{V_{kmRe} I_{kmRe} - V_{kmIm} I_{kmIm}}{2} \right] + \sin(2\omega t) \left[\frac{V_{kmIm} I_{kmRe} - V_{kmRe} I_{kmIm}}{2} \right] + \left[\frac{V_{kmRe} I_{kmRe} + V_{kmIm} I_{kmIm}}{2} \right]. \quad (3.81)$$

A variação de energia no MAFD do indutor em cada ciclo da frequência nominal pode ser calculada da seguinte forma:

$$\Delta E = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} p_{km}(t) dt, \quad (3.82)$$

$$\begin{aligned} \Delta E &= \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \cos(2\omega t) \left[\frac{V_{kmRe} I_{kmRe} - V_{kmIm} I_{kmIm}}{2} \right] dt \\ &+ \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \sin(2\omega t) \left[\frac{V_{kmIm} I_{kmRe} - V_{kmRe} I_{kmIm}}{2} \right] dt \\ &+ \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \left[\frac{V_{kmRe} I_{kmRe} + V_{kmIm} I_{kmIm}}{2} \right] dt. \end{aligned} \quad (3.83)$$

Em regime permanente, os fasores dinâmicos de tensão e corrente são constantes, conseqüentemente as duas primeiras parcelas integrais são notadamente nulas, logo:

$$\Delta E = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \left[\frac{V_{kmRe} I_{kmRe} + V_{kmIm} I_{kmIm}}{2} \right] dt = \frac{V_{kmRe} I_{kmRe} + V_{kmIm} I_{kmIm}}{2} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} dt, \quad (3.84)$$

$$\Delta E = \frac{V_{kmRe} I_{kmRe} + V_{kmIm} I_{kmIm}}{2} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} dt = \frac{\pi V_{kmRe} I_{kmRe} + \pi V_{kmIm} I_{kmIm}}{\omega}. \quad (3.85)$$

Substituindo-se as condições de regime (3.73) e (3.76) em (3.85):

$$\Delta E = \frac{-\pi\omega L I_{kmIm} I_{kmRe} + \pi\omega L I_{kmRe} I_{kmIm}}{\omega} \therefore \Delta E \equiv 0. \quad (3.86)$$

Logo, a equação (3.86) mostra que a potência dissipada no MAFD do indutor em cada ciclo de regime permanente é identicamente igual a zero. O mesmo acontece para os demais elementos ideais (sem perdas) como o capacitor e a LT de Bergeron sem perdas. Isto acontece porque em regime permanente toda potência dissipada pelo resistor do MAFD é fornecida pela fonte de corrente do MAFD, de modo que para o sistema o MAFD é passivo e sem perdas, como é esperado.

Durante períodos transitórios o MAFD do indutor trocará energia com a rede, mas isso corresponde com a realidade pois, de fato, após um transitório, o indutor pode receber energia das fontes e armazená-las em si na forma de campo magnético, assim como eventualmente pode fornecer transitoriamente para a rede parte dessa energia em uma outra situação. Isto pode ser facilmente provado recorrendo-se ao diagrama unifilar do consagrado modelo de acompanhamento original proposto por [DOMMEL 1969]:

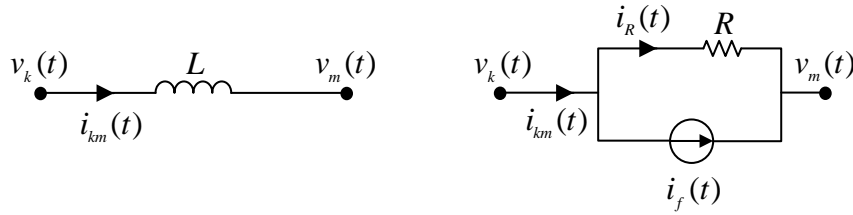


Figura 3.12 – Modelo de Acompanhamento.

O consumo de potência no resistor R da Figura 3.12 é dado por:

$$p_R(t) = [v_k(t) - v_m(t)] i_R(t) = v_{km}(t) \frac{v_{km}(t)}{R} = \frac{v_{km}^2(t)}{R}. \quad (3.87)$$

Substituindo-se a tensão em (3.87) pelo seu respectivo fasor dinâmico de frequência fundamental, tem-se:

$$p_R(t) = \frac{[V_{km\text{Re}}(t) \cos(\omega t) - V_{km\text{Im}}(t) \sin(\omega t)]^2}{R}, \quad (3.88)$$

$$p_R(t) = \frac{V_{km\text{Re}}^2(t) \cos^2(\omega t) + V_{km\text{Im}}^2(t) \sin^2(\omega t) - 2V_{km\text{Re}}(t)V_{km\text{Im}}(t) \cos(\omega t) \sin(\omega t)}{R}. \quad (3.89)$$

O valor médio da potência instantânea no resistor R é dado por:

$$P_R = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} p_R(t) dt, \quad (3.90)$$

$$\begin{aligned} P_R &= \frac{\omega}{2\pi R} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} V_{km\text{Re}}^2(t) \cos^2(\omega t) dt \\ &+ \frac{\omega}{2\pi R} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} V_{km\text{Im}}^2(t) \sin^2(\omega t) dt \\ &- \frac{\omega}{2\pi R} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} 2V_{km\text{Re}}(t)V_{km\text{Im}}(t) \cos(\omega t) \sin(\omega t) dt, \end{aligned} \quad (3.91)$$

$$P_R = \frac{V_{km\text{Re}}^2 + V_{km\text{Im}}^2}{2R}. \quad (3.92)$$

A potência da fonte de corrente da Figura 3.12 é dado por:

$$p_f(t) = [v_k(t) - v_m(t)] i_f(t), \quad (3.93)$$

$$p_f(t) = [v_k(t) - v_m(t)] i_f(t) = v_{km}(t) [i_{km}(t) - i_R(t)] = v_{km}(t) i_{km}(t) - v_{km}(t) i_R(t), \quad (3.94)$$

$$p_f(t) = p_{km}(t) - p_R(t). \quad (3.95)$$

Por (3.95) verifica-se que a potência instantânea da fonte de corrente possui duas parcelas: a parcela de armazenamento de potência no indutor, o qual está sendo representado pelo seu MAFD e a parcela de geração da potência que será consumida pelo resistor. Portanto, o conjunto resistor-fonte possui a mesma potência do indutor ideal, o qual o modelo de acompanhamento está representando.

Capítulo 4

Simulação de Transitórios Eletromagnéticos com Fasores Dinâmicos (DPTS)

Neste capítulo é apresentada a metodologia de simulação de transitórios eletromagnéticos com fasores dinâmicos, a qual é denominada pela sigla DPTS (*Dynamic Phasors Transient Simulation*) daqui em diante. Inicialmente, é apresentada a formulação para o cálculo de transitórios com fasores dinâmicos pela análise nodal. A partir desta formulação foi desenvolvido um algoritmo básico no MATLAB para solução de transitórios de uma rede genérica. Os resultados são comparados com aqueles produzidos pela metodologia de integração trapezoidal tradicional [DOMMEL 1969], [ZANETTA 2003] através de simulações no programa PSCAD/EMTDC [MANITOBA 1994].

4.1 Formulação para cálculo de transitórios por análise nodal

Em análises de redes elétricas é muito comum a utilização da análise nodal, onde a Lei de Kirchhoff das Correntes é aplicada a cada um dos nós do circuito de modo a obter um conjunto de equações algébricas, as quais podem naturalmente ser escritas em forma matricial. Seja um nó k genérico (mostrado na Figura 4.1) de uma rede contendo n_b barras, cujas tensões e correntes são representadas através de fasores dinâmicos e as impedâncias são representadas por matrizes de ordem 2 chamadas tensores [PORTELA 1970].

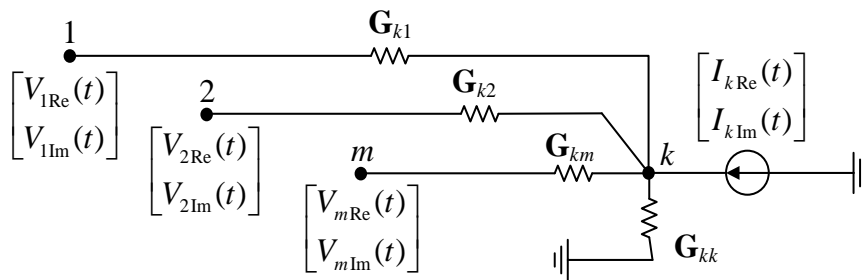


Figura 4.1 – Nó k genérico de uma rede descrita por fasores dinâmicos.

$$\begin{bmatrix} I_{k\text{Re}}(t) \\ I_{k\text{Im}}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{G}_{k1} \left(\begin{bmatrix} V_{k\text{Re}}(t) \\ V_{k\text{Im}}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{1\text{Re}}(t) \\ V_{1\text{Im}}(t) \end{bmatrix} \right) + \mathbf{G}_{k2} \left(\begin{bmatrix} V_{k\text{Re}}(t) \\ V_{k\text{Im}}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{2\text{Re}}(t) \\ V_{2\text{Im}}(t) \end{bmatrix} \right) + \mathbf{G}_{kk} \begin{bmatrix} V_{k\text{Re}}(t) \\ V_{k\text{Im}}(t) \end{bmatrix} + \mathbf{G}_{km} \left(\begin{bmatrix} V_{k\text{Re}}(t) \\ V_{k\text{Im}}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{m\text{Re}}(t) \\ V_{m\text{Im}}(t) \end{bmatrix} \right) \quad (4.1)$$

$$\begin{bmatrix} I_{k\text{Re}}(t) \\ I_{k\text{Im}}(t) \end{bmatrix} = -\mathbf{G}_{k1} \begin{bmatrix} V_{1\text{Re}}(t) \\ V_{1\text{Im}}(t) \end{bmatrix} - \mathbf{G}_{k2} \begin{bmatrix} V_{2\text{Re}}(t) \\ V_{2\text{Im}}(t) \end{bmatrix} + \dots + (\mathbf{G}_{k1} + \mathbf{G}_{k2} + \mathbf{G}_{kk} + \dots + \mathbf{G}_{km}) \begin{bmatrix} V_{k\text{Re}}(t) \\ V_{k\text{Im}}(t) \end{bmatrix} + \dots - \mathbf{G}_{km} \begin{bmatrix} V_{m\text{Re}}(t) \\ V_{m\text{Im}}(t) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

A equação (4.2) corresponde ao resultado matemático da aplicação da Lei de Kirchoff das correntes no nó genérico k . A matriz \mathbf{G}_{kk} corresponde ao tensor de condutância entre o nó k e a terra. A matriz \mathbf{G}_{km} corresponde ao tensor de condutância entre os nós k e m .

Considerando-se que a rede completa não contém impedâncias mútuas, pode-se estender a formulação obtendo desta forma uma matriz de tensores de admitâncias nodais, a qual relaciona os fasores de tensão e corrente em cada um dos nós da rede completa. O sistema de equações escrito em forma matricial fica com a seguinte forma mostrada em:

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ I_{k\text{Re}}(t) \\ I_{k\text{Im}}(t) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ g_{k1}^{11} & g_{k1}^{12} & \dots & \dots & g_{kk}^{11} & g_{kk}^{12} & \dots & \dots & g_{km}^{11} & g_{km}^{12} \\ g_{k1}^{21} & g_{k1}^{22} & \dots & \dots & g_{kk}^{21} & g_{kk}^{22} & \dots & \dots & g_{km}^{21} & g_{km}^{22} \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix}_{2n_b \times 2n_b} \begin{bmatrix} V_{1\text{Re}}(t) \\ V_{1\text{Im}}(t) \\ \vdots \\ \vdots \\ V_{k\text{Re}}(t) \\ V_{k\text{Im}}(t) \\ \vdots \\ \vdots \\ V_{m\text{Re}}(t) \\ V_{m\text{Im}}(t) \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

onde os tensores 2x2 [PORTELA 1970] pertencentes à diagonal principal são calculados do seguinte modo:

$$\begin{bmatrix} g_{kk}^{11} & g_{kk}^{12} \\ g_{kk}^{21} & g_{kk}^{22} \end{bmatrix} = \sum_m \mathbf{G}_{km}. \quad (4.4)$$

Por outro lado, os tensores 2x2 que estão fora da diagonal principal são:

$$\begin{bmatrix} g_{km}^{11} & g_{km}^{12} \\ g_{km}^{21} & g_{km}^{22} \end{bmatrix} = -\mathbf{G}_{km} . \quad (4.5)$$

Portanto, de uma maneira geral, representa-se o sistema de equações de uma rede genérica por análise nodal da seguinte forma:

$$\tilde{\mathbf{i}}_f(t) + \tilde{\mathbf{i}}_h(t) = \mathbf{G}\tilde{\mathbf{v}}(t), \quad (4.6)$$

onde:

\mathbf{G} : Matriz de tensores de condutâncias (dimensões $2n_b \times 2n_b$);

$\tilde{\mathbf{i}}_f(t)$: Vetor de fasores dinâmicos de injeções de corrente associadas às fontes;

$\tilde{\mathbf{i}}_h(t)$: Vetor de fasores dinâmicos de injeções de corrente associadas às informações passadas (histórico);

$\tilde{\mathbf{v}}(t)$: Vetor de fasores dinâmicos das tensões nos nós (tensões conhecidas das fontes e demais tensões desconhecidas);

Particionando-se (4.6) em função das tensões conhecidas e desconhecidas tem-se:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{i}}_c \\ \tilde{\mathbf{i}}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{cc} & \mathbf{G}_{cd} \\ \mathbf{G}_{dc} & \mathbf{G}_{dd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{v}}_c \\ \tilde{\mathbf{v}}_d \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

Na equação matricial (4.7), o índice “c” refere-se a valores conhecidos de tensão e o índice “d” refere-se a valores desconhecidos de tensão. O vetor $\tilde{\mathbf{i}}_c$ é composto pelas fontes de corrente conectadas nas barras cujas tensões são conhecidas e o vetor $\tilde{\mathbf{i}}_d$ pelas fontes de corrente conectadas nas barras cujas tensões são desconhecidas. Obtém-se as tensões desconhecidas em cada passo de integração do método trapezoidal do seguinte modo:

$$\tilde{\mathbf{i}}_d = \mathbf{G}_{dc} \tilde{\mathbf{v}}_c + \mathbf{G}_{dd} \tilde{\mathbf{v}}_d, \quad (4.8)$$

$$\tilde{\mathbf{v}}_d = [\mathbf{G}_{dd}]^{-1} [\tilde{\mathbf{i}}_d - \mathbf{G}_{dc} \tilde{\mathbf{v}}_c]. \quad (4.9)$$

As fontes de corrente $\tilde{\mathbf{i}}_d$ são provenientes de informações passadas (histórico) e são, portanto, determináveis. As tensões conhecidas $\tilde{\mathbf{v}}_c$ são as tensões dos geradores. As matrizes \mathbf{G}_{dd} e \mathbf{G}_{dc} não sofrerão alteração enquanto não houver uma mudança topológica da rede ou uma mudança no passo de integração Δt . É importante observar que, embora (4.9) contenha uma inversão de matriz, é bem mais eficiente solucionar sistemas lineares que envolvem matrizes esparsas através de eliminação de Gauss ou por fatoração triangular ordenada. Tal fatoração oferece vantagens computacionais importantes em determinadas aplicações, pois os erros de arredondamento são significativamente reduzidos [TINNEY 1967a], [TINNEY 1967b].

4.2 Algoritmo do DPTS no MATLAB

Com o objetivo de demonstrar computacionalmente o DPTS, implementou-se no Programa MATLAB um primeiro algoritmo, cujo fluxograma é mostrado na Figura 4.2.

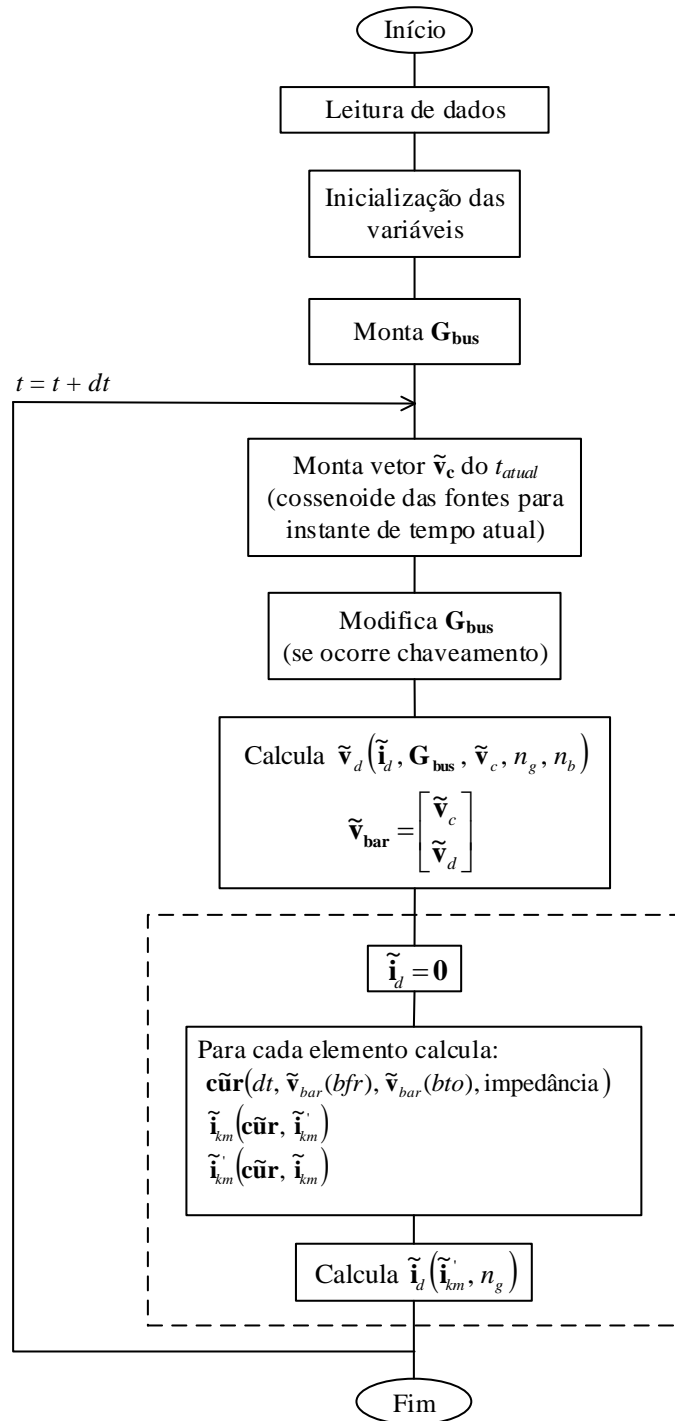


Figura 4.2 – Fluxograma básico do DPTS implementado no MATLAB.

Na Figura 4.2, o algoritmo inicia-se pela leitura de dados que consiste em uma sub-rotina que armazena em vetores os parâmetros de elementos da rede, a topologia (barras, ramos e elementos *shunt*), as fontes de tensão, dados de chaves e dados de simulação (passo de integração e tempo máximo de simulação). Após a inicialização das variáveis e vetores

(onde todos os vetores são inicializados com zeros), a matriz de condutância nodal \mathbf{G}_{bus} presente na equação (4.3) é montada considerando os dados de cada elemento da rede.

A partir deste ponto, inicia-se o laço principal de tempo e o vetor de tensões conhecidas (fontes) $\tilde{\mathbf{v}}_c$ é montado para o instante de tempo t atual da seguinte maneira: Para cada gerador tem-se a equação de sua tensão terminal:

$$\begin{cases} v_{g1}(t) = \hat{V}_{g1} \cos(\omega_0 t + \theta_{g1}); \\ v_{g2}(t) = \hat{V}_{g2} \cos(\omega_0 t + \theta_{g2}); \\ \vdots \\ v_{g\varphi}(t) = \hat{V}_{g\varphi} \cos(\omega_0 t + \theta_{g\varphi}); \\ \vdots \\ v_{gn_g}(t) = \hat{V}_{gn_g} \cos(\omega_0 t + \theta_{gn_g}); \end{cases} \quad (4.10)$$

onde φ é o índice genérico para as n_g fontes de tensão (geradores) conectadas ao sistema.

$\hat{V}_{g\varphi}$ e $\theta_{g\varphi}$ são respectivamente o módulo e ângulo da tensão instantânea do gerador φ .

$$\cos(a+b) = \cos(a)\cos(b) - \sin(a)\sin(b). \quad (4.11)$$

Pela identidade trigonométrica (4.11) aplicada ao gerador φ tem-se:

$$v_{g\varphi}(t) = \hat{V}_{g\varphi} \cos(\omega_0 t + \theta_{g\varphi}) = \hat{V}_{g\varphi} \cos(\omega_0 t) \cos(\theta_{g\varphi}) - \hat{V}_{g\varphi} \sin(\omega_0 t) \sin(\theta_{g\varphi}). \quad (4.12)$$

A tensão do gerador φ pode ser igualada a seu fasor dinâmico de frequência fundamental:

$$v_{g\varphi}(t) = V_{g\varphi \text{Re}} \cos(\omega_0 t) - V_{g\varphi \text{Im}} \sin(\omega_0 t). \quad (4.13)$$

Igualando (4.12) e (4.13):

$$V_{g\varphi \text{Re}} \cos(\omega_0 t) - V_{g\varphi \text{Im}} \sin(\omega_0 t) = \hat{V}_{g\varphi} \cos(\omega_0 t) \cos(\theta_{g\varphi}) - \hat{V}_{g\varphi} \sin(\omega_0 t) \sin(\theta_{g\varphi}). \quad (4.14)$$

Igualando-se os termos que multiplicam $\cos(\omega_0 t)$ e $\sin(\omega_0 t)$ em ambos os lados de (4.14):

$$V_{g\varphi \text{Re}} = \hat{V}_{g\varphi} \cos(\theta_{g\varphi}), \quad (4.15)$$

$$V_{g\varphi \text{Im}} = -\hat{V}_{g\varphi} \text{sen}(\theta_{g\varphi}). \quad (4.16)$$

Portanto, o vetor de tensões conhecidas é:

$$\tilde{\mathbf{v}}_c = \begin{bmatrix} V_{g1\text{Re}} \\ V_{g1\text{Im}} \\ \vdots \\ V_{g\varphi\text{Re}} \\ V_{g\varphi\text{Im}} \\ \vdots \\ V_{g n_g \text{Re}} \\ V_{g n_g \text{Im}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{V}_{g1} \cos(\theta_{g1}) \\ -\hat{V}_{g1} \text{sen}(\theta_{g1}) \\ \vdots \\ \hat{V}_{g1} \cos(\theta_{g1}) \\ -\hat{V}_{g1} \text{sen}(\theta_{g1}) \\ \vdots \\ \hat{V}_{g n_g} \cos(\theta_{g n_g}) \\ -\hat{V}_{g n_g} \text{sen}(\theta_{g n_g}) \end{bmatrix}. \quad (4.17)$$

Continuando no algoritmo da Figura 4.2, após a montagem do vetor (4.17) é feita uma verificação se ocorrem chaveamentos no instante atual e, caso positivo, a matriz \mathbf{G}_{bus} é devidamente modificada pela rotina CHAVES, a qual é explicada em detalhes no seguinte algoritmo:

Algoritmo 4.1 – Rotina CHAVES (modificação da Gbus nos chaveamentos).

```

01 Início:
02   Guarda valores anteriores da matriz de condutâncias de barras ( $\mathbf{G}_{\text{bus}0} = \mathbf{G}_{\text{bus}}$ );
03   Para  $\eta$  de 1 até (número de chaves) faça:
04     Se  $(T_{\text{chave}}(\eta) > i * \Delta t - 3 * \Delta t / 2)$  e  $(T_{\text{chave}}(\eta) < i * \Delta t - \Delta t / 2)$ , faça:
05       Se  $\text{tipo}(\eta) = 1$ , faça:
06         Retira  $1/R_{\text{on}}(\eta)$  e coloca  $1/R_{\text{off}}(\eta)$  na  $\mathbf{G}_{\text{bus}}$ ;
07       Fim.
08       Se  $\text{tipo}(\eta) = 2$ , faça:
09         Retira  $1/R_{\text{off}}(\eta)$  e coloca  $1/R_{\text{on}}(\eta)$  na  $\mathbf{G}_{\text{bus}}$ ;
10       Fim.
11     Fim.
12   Fim.
13 Fim.
```

No Algoritmo 4.1, η é o índice que indica a chave atual que está sendo tratada, $T_{\text{chave}}(\eta)$ é o tempo de ocorrência do chaveamento da chave η , tipo é o tipo de evento (tendo valor igual a 1 ou 2 para abertura ou fechamento da chave, respectivamente), $R_{\text{on}}(\eta)$ é a resistência da chave η quando aberta e $R_{\text{off}}(\eta)$ é a resistência da chave η quando fechada.

Após a execução da rotina CHAVES, o sistema linear (4.9) é resolvido [FRANCO 2006] para obtenção do vetor de tensões desconhecidas $\tilde{\mathbf{v}}_d$ e, conseqüentemente, obtém-se o vetor $\tilde{\mathbf{v}}_{bar}$ das tensões em todas as barras do sistema, sendo que n_b é o número total de barras do sistema. O passo seguinte é o cálculo das correntes injetadas nas barras e as correntes nos elementos (ramos), de modo a obter-se o vetor $\tilde{\mathbf{i}}_d$, o qual é obtido através das equações descritas no Capítulo 3 e é função dos termos históricos $\tilde{\mathbf{i}}_{km}$ e que será utilizado no próximo passo de integração. Δt é o passo de integração, bfr é o número da barra “de” (*from*) e bto é o número da barra “para” (*to*).

4.3 Simulações e Validação do primeiro protótipo DPTS

Para permitir a validação do algoritmo escrito no MATLAB do primeiro protótipo do DPTS, foi modelado no PSCAD/EMTDC alguns Sistemas Teste e a resposta foi comparada com aquela simulada no MATLAB. Inicialmente foi simulada a energização da linha de transmissão do Sistema Teste 1a, ou seja, a fonte foi conectada ao sistema em $t=0$. A Figura 4.3 mostra o diagrama do sistema modelado no PSCAD, cujos dados estão contidos no Apêndice B (Tabela B.2). O modelo de LT sem perdas que o PSCAD utiliza é idêntico ao Bergeron que está sendo utilizado no DPTS, de modo que produzem resultados idênticos. Embora o sistema simulado no PSCAD seja trifásico, o mesmo pode ser comparado com o DPTS (monofásico), desde que não sejam simulados eventos desequilibrados. A Figura 4.4 mostra o diagrama do sistema simulado no MATLAB.

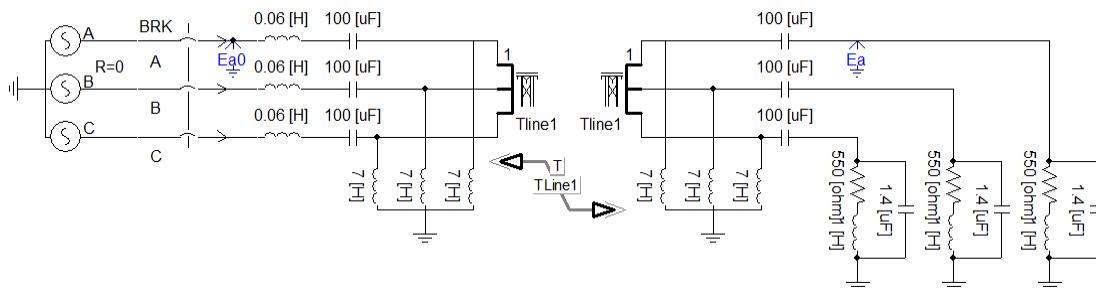


Figura 4.3 – Modelo do Sistema Teste 1a no PSCAD.

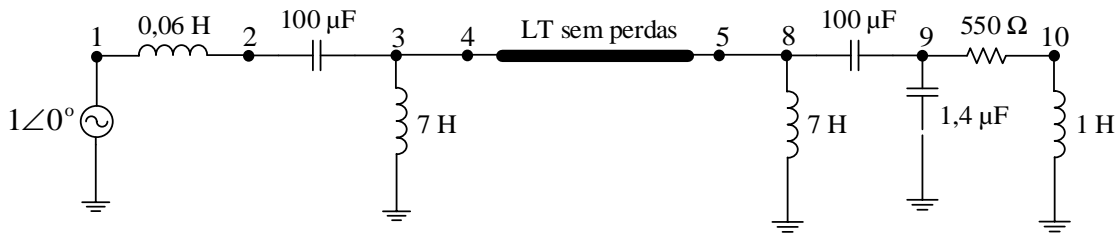


Figura 4.4 - Modelo do Sistema Teste 1a no DPTS.

A Figura 4.5 mostra a comparação entre as curvas (tensão na barra 9) simuladas no DPTS e no PSCAD/EMTDC para o evento citado. Observa-se que o resultado foi idêntico em ambos simuladores.

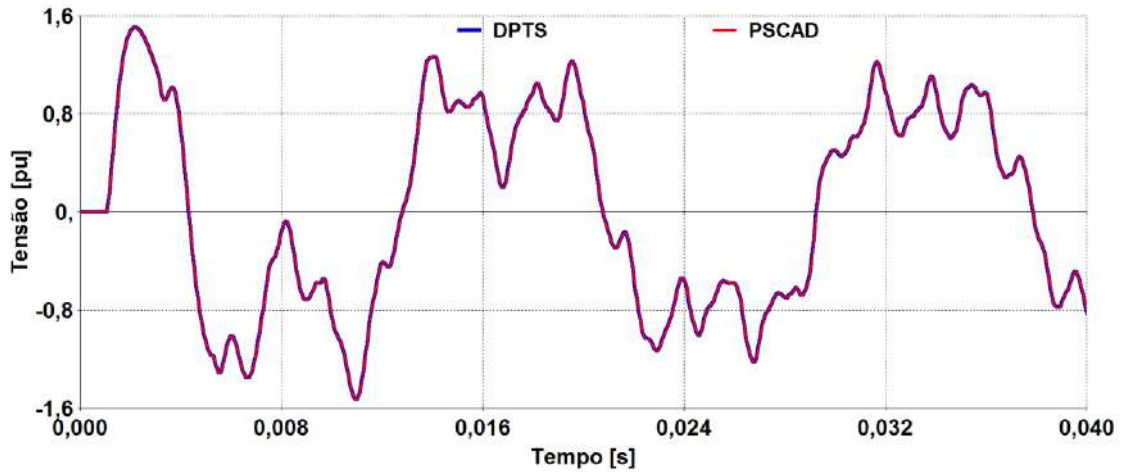


Figura 4.5 – Comparação DPTS e PSCAD no Sistema Teste 1a – Tensão na barra 9.

Foi simulada também a energização da linha de transmissão (modelo considerando as perdas) do Sistema Teste 2a. A Figura 4.6 mostra o diagrama do sistema modelado no PSCAD, cujos dados estão contidos no Apêndice B (Tabela B.3). A Figura 4.7 mostra o diagrama do sistema simulado no MATLAB.

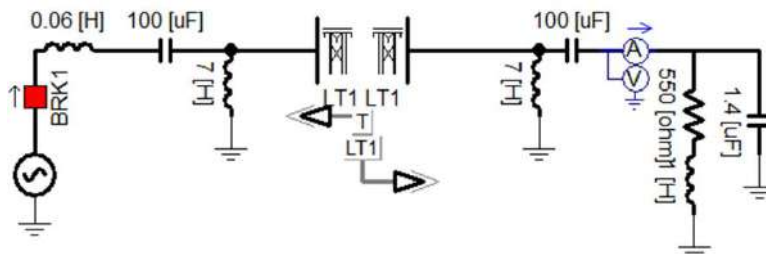


Figura 4.6 – Modelo do Sistema Teste 2a no PSCAD.

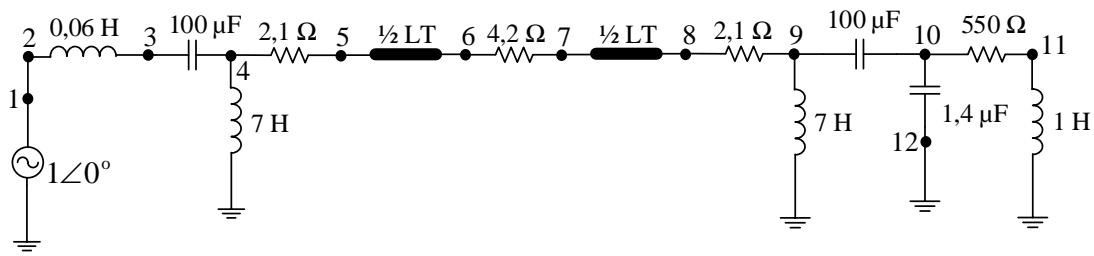


Figura 4.7 - Modelo do Sistema Teste 2a no MATLAB.

A Figura 4.8 mostra a comparação entre as curvas (tensão na barra 10) simuladas no DPTS e no PSCAD/EMTDC para o evento citado. Observa-se que novamente o resultado foi coincidente em ambos simuladores.

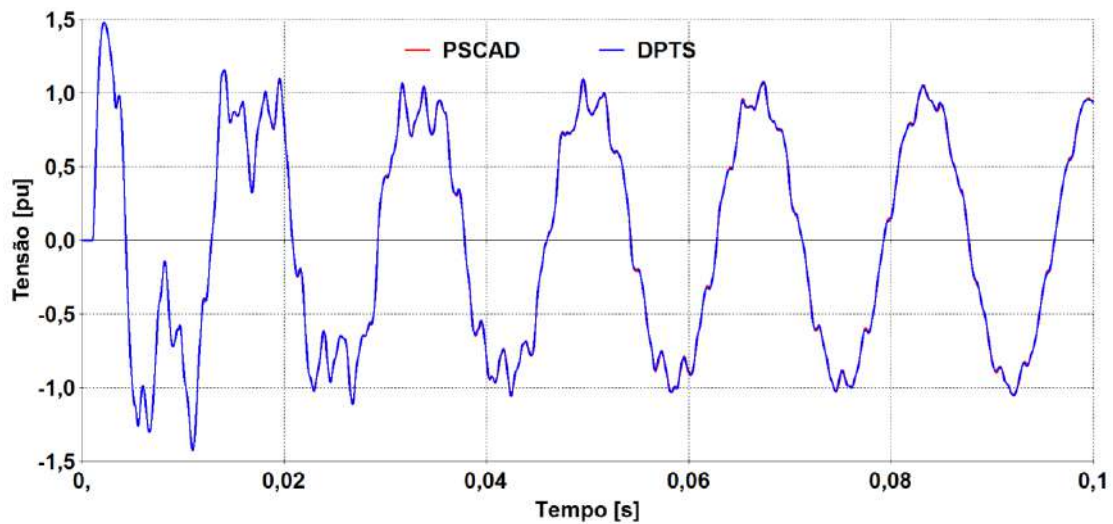


Figura 4.8 - Comparação DPTS e PSCAD no Sistema Teste 2a – Tensão na barra 10.

Finalmente foi simulado o chaveamento da carga RL, a qual foi conectada na barra 10 em $t=0,15s$ no Sistema Teste 2b (Figura 4.10). A Figura 4.9 mostra o diagrama do sistema modelado no PSCAD, cujos dados estão contidos no Apêndice B (Tabela B.4).

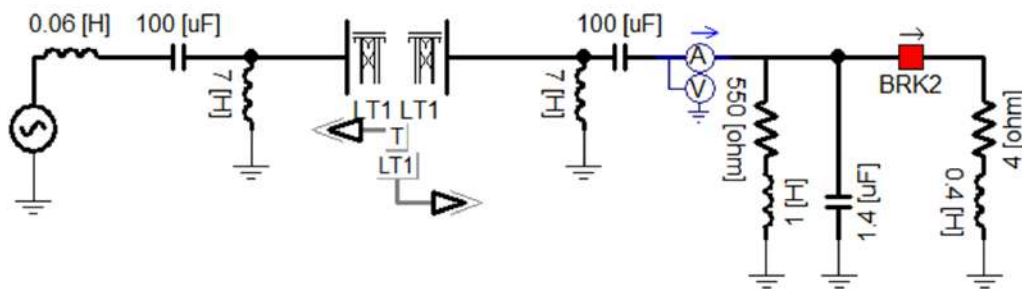


Figura 4.9 - Modelo do Sistema Teste 2b no PSCAD.

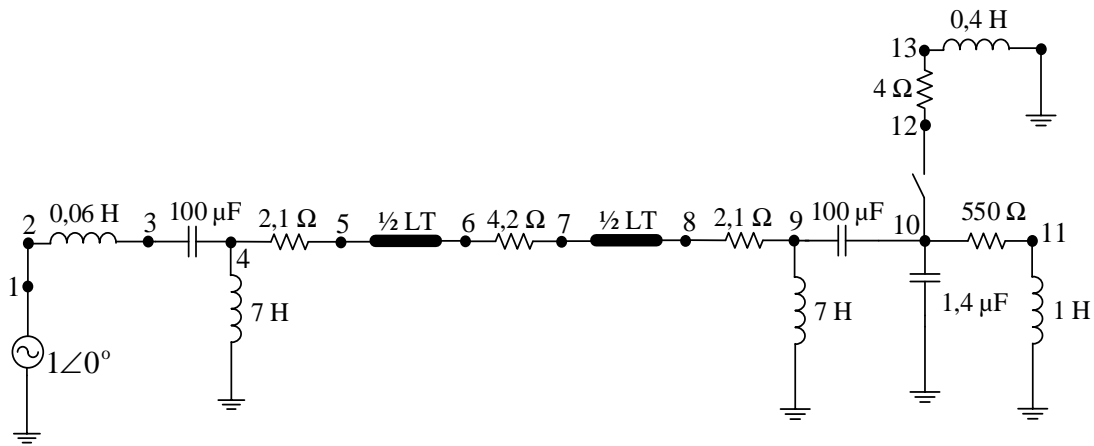


Figura 4.10 - Modelo do Sistema Teste 2b no MATLAB.

A Figura 4.11 mostra a comparação entre as curvas (tensão na barra 10) simuladas no DPTS e no PSCAD/EMTDC para o evento citado. Observa-se que o resultado é visualmente coincidente em ambos simuladores. Concluiu-se assim a validação do primeiro protótipo do algoritmo proposto neste capítulo.

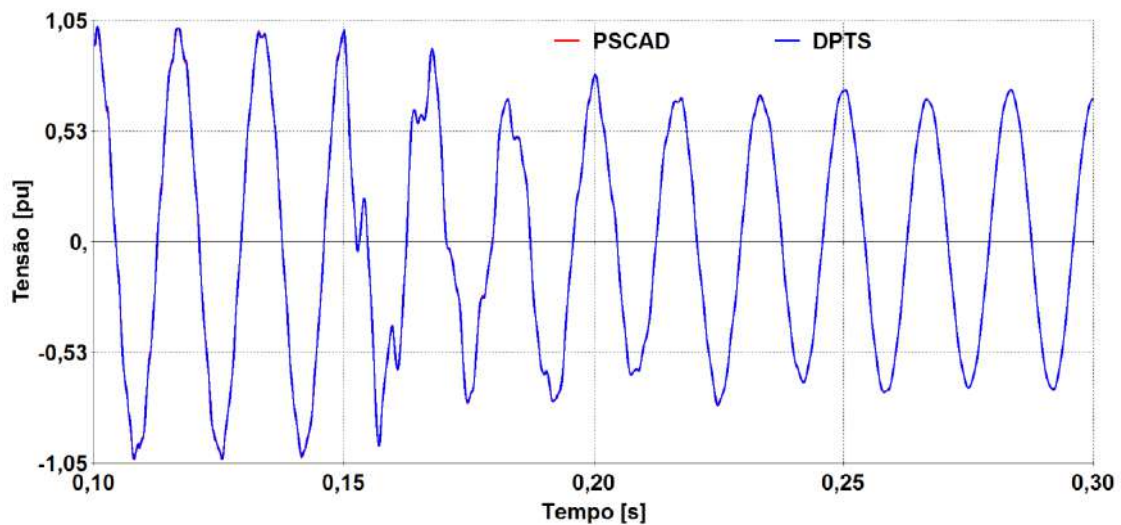


Figura 4.11 - Comparação DPTS e PSCAD no Sistema Teste 2b – Tensão na barra 10.

Capítulo 5

Simulação por FD Incluindo Elementos Não-Lineares

Neste capítulo é apresentada a evolução do método DPTS para permitir a solução desacoplada de modelos não-lineares com a rede. Para validar esta metodologia, foram implementadas as equações de FD para um equipamento FACTS (o SVC) no algoritmo do simulador DPTS. Foi considerada uma aproximação de primeira ordem da corrente do SVC, a qual é injetada na barra de fronteira com a rede, levando a um modelo denominado de Modelo Linearizado de Acompanhamento (MLA).

Esta metodologia de solução desacoplada foi implementada no algoritmo do DPTS desenvolvido no MATLAB e seus resultados são validados com simulações no PSCAD. Também é apresentado neste capítulo um exemplo didático da aplicação do MLA, onde alguns métodos de solução possíveis são comparados. A inicialização da rede elétrica (regime permanente) e a técnica de extrapolação de variáveis também foram utilizadas na solução numérica, a qual será explicada neste Capítulo. É apresentado também o processo utilizado para a inicialização do sistema que é proporcionada pelo novo simulador graças à modelagem analítica dos equipamentos não-lineares.

5.1 Inicialização no DPTS (regime permanente)

Quando se simula redes elétricas em programas de simulação de transitórios eletromagnéticos, é usual a criação de um arquivo chamado de *snapshot*, o qual é criado simulando-se o sistema por um determinado período para que o mesmo entre em regime permanente. Uma vez criado o *snapshot*, as simulações posteriores são realizadas partindo-se deste ponto de operação inicial, havendo a necessidade de se criar um outro *snapshot* somente se algum parâmetro da rede, equipamentos ou controle for alterado. Ocorre que em muitos casos práticos, tal inicialização pode tornar-se um processo demorado, complicado e, em certos casos, pode até não ser possível (caso o sistema

apresente comportamento instável). Em casos de respostas oscilatórias pouco amortecidas, pode ser necessário simular um tempo muito elevado para alcançar o regime permanente, o que também pode inviabilizar o recurso.

Além disto, tal processo depende fortemente da experiência do analista, pois muitas vezes são utilizados artifícios para se conseguir um ponto de operação através do *snapshot*, principalmente em sistemas com alto grau de complexidade, múltiplos equipamentos com sistemas de controle complexos (alto grau de liberdade). Diante disto, a inicialização automática é uma característica bastante desejável em um simulador de transitórios. A seguir, são apresentados os algoritmos que mostram como foram implementados no DPTS os processos de inicialização da rede e do TCR. São apresentados também os resultados de uma simulação comparativa com o PSCAD/EMTDC.

Algoritmo 5.1 – Inicialização do TCR.

```

01 Início:
02  Estimação dos valores do ângulo de condução  $\sigma_0$ ;
03  Montagem da matriz de admitância nodal da rede  $\mathbf{Y}_{\text{barra0}}$ ;
04  Cálculo da admitância do TCR e inclusão da mesma na matriz  $\mathbf{Y}_{\text{barra0}}$ ;
05  Atualização das tensões conhecidas  $\tilde{\mathbf{v}}_{c0}$  das fontes (geradores);
06  Solução do sistema linear da rede para obtenção de  $\tilde{\mathbf{v}}_{d0}$ , considerando-se  $\tilde{\mathbf{i}}_{d0} = \mathbf{0}$ ;
07  Retirada da admitância do TCR da matriz  $\mathbf{Y}_{\text{barra0}}$ ;
08  Inicialização do ângulo de referência  $\theta_{PLL0}$  e da tensão de referência  $V_{ref0}$ ;
09  Inicialização da tensão terminal  $\tilde{\mathbf{u}}_0$  do TCR, que está contida em  $\tilde{\mathbf{v}}_{\text{barra0}}$ ;
10  Enquanto {erro > tolerância} e {não atingir máximo de iterações} faça:
11    Montagem das matrizes  $\mathbf{A}_0$  e  $\mathbf{B}_0$ ;
12    Solução do sistema  $\mathbf{A}_0 \tilde{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{B}_0 \tilde{\mathbf{u}}_0 = \mathbf{0}$  para obtenção de  $\tilde{\mathbf{i}}_{d0}$ ;
13    Solução do sistema linear da rede para obtenção de  $\tilde{\mathbf{v}}_{d0}$ ;
14    Atualização da tensão terminal  $\tilde{\mathbf{u}}_0$  do TCR, que está contida em  $\tilde{\mathbf{v}}_{\text{barra0}}$ ;
15    Cálculo de  $V_{rms0}$  (para controle de tensão);
16    Modifica o valor de  $\alpha_0$  (se  $V_{ref}$  for dado);
17    Cálculo de  $\theta_{PLL0}$  e  $\sigma_0$ ;
18    Cálculo do erro para os ângulos principais ( $\Delta\alpha_0$ ,  $\Delta\theta_{PLL0}$  e  $\Delta\sigma_0$ );
19  Fim.
20  Cálculo das susceptâncias  $B_{n0}$  e  $B_{tcr0}$ ;
21  Montagem do vetor  $\mathbf{x}_i = [\tilde{\mathbf{x}}_0 \ V_{rms0} \ V_{ref0} \ B_{tcr0} \ B_{n0} \ \alpha_0 \ \theta_{PLL0} \ \sigma_0]$ ;
22 Fim.

```

No passo 02 do Algoritmo 5.1 o valor do ângulo de condução σ_0 é estimado utilizando-se a equação (A.5) que consta no Apêndice A. No passo 03 a matriz de admitância nodal da rede $\mathbf{Y}_{\text{barra0}}$ é montada considerando-se que as admitâncias dos resistores, indutores e capacitores da rede são, respectivamente:

$$Y_{km} = \frac{1}{R}, \quad Y_{km} = \frac{1}{j\omega_0 L} \text{ e } Y_{km} = j\omega_0 C. \quad (5.1)$$

Para o caso das LTs modeladas por Bergeron, as admitâncias da diagonal principal (y_s) e as admitâncias fora da diagonal principal (y_m) [GOMES 2005a] são as seguintes:

$$y_s = \sqrt{\frac{j\omega_0 C_{LT}}{R_{LT} + j\omega_0 L_{LT}}} \coth\left(l\sqrt{(j\omega_0 C_{LT})(R_{LT} + j\omega_0 L_{LT})}\right), \quad (5.2)$$

$$y_m = -\frac{\sqrt{\frac{j\omega_0 C_{LT}}{R_{LT} + j\omega_0 L_{LT}}}}{\sinh\left(l\sqrt{(j\omega_0 C_{LT})(R_{LT} + j\omega_0 L_{LT})}\right)}, \quad (5.3)$$

onde R_{LT} , L_{LT} e C_{LT} são parâmetros da LT e l é o seu comprimento. No passo 04 a admitância do TCR é calculada e incluída na matriz de admitância nodal:

$$y_{tcr} = \frac{1}{j\omega_n \left(\frac{L_{tcr}}{3q}\right)}, \quad (5.4)$$

onde a função de chaveamento q é aproximada pela equação (A.6) presente no Apêndice A. No passo 05 as tensões conhecidas $\tilde{\mathbf{v}}_{c0}$ são atualizadas utilizando-se (4.17). Para que as tensões desconhecidas sejam obtidas, é necessário solucionar o seguinte sistema:

$$\tilde{\mathbf{i}}_{\text{barra0}} = \mathbf{Y}_{\text{barra0}} \tilde{\mathbf{v}}_{\text{barra0}}. \quad (5.5)$$

onde $\tilde{\mathbf{v}}_{\text{barra0}}$ é o vetor das tensões das barras do sistema e $\tilde{\mathbf{i}}_{\text{barra0}}$ é o vetor de fontes de corrente injetadas nestas barras. Particionando-se (5.5) pelas tensões conhecidas ($\tilde{\mathbf{v}}_{c0}$) e desconhecidas ($\tilde{\mathbf{v}}_{d0}$) do sistema, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{i}}_{c0} \\ \tilde{\mathbf{i}}_{d0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{cc} & \mathbf{Y}_{cd} \\ \mathbf{Y}_{dc} & \mathbf{Y}_{dd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{v}}_{c0} \\ \tilde{\mathbf{v}}_{d0} \end{bmatrix}. \quad (5.6)$$

De (5.6) podemos escrever:

$$\tilde{\mathbf{i}}_{d0} = \mathbf{Y}_{dc} \tilde{\mathbf{v}}_{c0} + \mathbf{Y}_{dd} \tilde{\mathbf{v}}_{d0}, \quad (5.7)$$

$$\tilde{\mathbf{v}}_{d0} = [\mathbf{Y}_{dd}]^{-1} [\tilde{\mathbf{i}}_{d0} - \mathbf{Y}_{dc} \tilde{\mathbf{v}}_{c0}]. \quad (5.8)$$

No passo 06 o sistema linear (5.8) é solucionado com $\tilde{\mathbf{i}}_{d0} = 0$, uma vez que o TCR é considerado através da inclusão de sua admitância y_{tcr} na matriz \mathbf{Y}_{barra0} . No passo 07 a admitância do TCR é retirada da matriz \mathbf{Y}_{barra0} .

No passo 08 o ângulo de referência θ_{PLL} é calculado por (A.29) e a tensão de referência V_{ref0} é calculada por (A.14) e (A.28). No passo 09 o vetor da tensão terminal do TCR $\tilde{\mathbf{u}}_0$ é obtido do vetor $\tilde{\mathbf{v}}_{d0}$ previamente calculado, nas duas posições correspondentes à barra onde o TCR encontra-se conectado:

$$\tilde{\mathbf{u}}_0 = \begin{bmatrix} V_{tcr \text{ Re}}(t) \\ V_{tcr \text{ Im}}(t) \end{bmatrix}. \quad (5.9)$$

No passo 10 um laço iterativo de Gauss-Seidel é iniciado e nos passos 11 e 12 o sistema:

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_0 = \mathbf{A}_0 \tilde{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{B}_0 \tilde{\mathbf{u}}_0, \quad (5.10)$$

é solucionado para obtenção do vetor $\tilde{\mathbf{x}}_0$, que é o vetor de estados do TCR, composto dos FDs de tensão e corrente do mesmo. As matrizes \mathbf{A}_0 e \mathbf{B}_0 são montadas utilizando-se as equações (A.7)-(A.13) relativas à função de chaveamento do TCR.

$$\tilde{\mathbf{x}}_0 = \begin{bmatrix} V_{tcr \text{ Re}}(t) \\ V_{tcr \text{ Im}}(t) \\ I_{tcr \text{ Re}}(t) \\ I_{tcr \text{ Im}}(t) \end{bmatrix}. \quad (5.11)$$

Em regime permanente, as componentes reais e imaginárias dos fasores dinâmicos em (5.11) são constantes e, portanto, o vetor $\tilde{\mathbf{x}}_0$ é constante:

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_0 = 0 \Rightarrow \tilde{\mathbf{x}}_0 = \mathbf{A}_0^{-1} \mathbf{B}_0 \tilde{\mathbf{u}}_0. \quad (5.12)$$

Solucionando-se o sistema linear (5.12), obtém-se então o vetor de correntes:

$$\tilde{\mathbf{i}}_{d0} = \begin{bmatrix} I_{tcr \text{ Re}}(t) \\ I_{tcr \text{ Im}}(t) \end{bmatrix}. \quad (5.13)$$

No passo 13 o sistema linear (5.8) é novamente solucionado considerando-se o valor de $\tilde{\mathbf{i}}_{d0}$ previamente obtido e no passo 14 o vetor $\tilde{\mathbf{u}}_0$ é atualizado. No passo 15 a tensão eficaz do TCR é calculada através de (A.14).

Quando a tensão de referência V_{ref} do controle de tensão do TCR é fornecida como dado de entrada, o ângulo de disparo α deve ser modificado de modo a produzir o valor de V_{ref} desejado. Neste caso, pode-se estimar o novo valor de α baseando-se em uma equação de sua sensibilidade em relação à tensão de referência utilizando-se os valores das variáveis da iteração anterior. Esta sensibilidade pode ser calculada utilizando-se os valores de α e V_{ref} relativos à iteração atual e anterior da seguinte forma:

$$\alpha^{i+1} = \alpha^i + \frac{\alpha^i - \alpha^{i-1}}{V_{rms}^i - V_{rms}^{i-1}} (V_{ref} - V_{rms}^i). \quad (5.14)$$

No passo 16 (5.14) é utilizada para modificar o valor de α_0 . No passo 17 o ângulo de referência θ_{PLL} é calculado através de (A.29) e o ângulo de condução σ_0 é calculado através de (A.25)-(A.26). No passo 18 o *erro* é calculado por:

$$erro = \text{MAX}\{\Delta\alpha_0, \Delta\theta_{PLL0}, \Delta\sigma_0\}. \quad (5.15)$$

Uma vez finalizado o laço iterativo de Gauss, no passo 20 as susceptância do TCR são calculadas por (A.20)-(A.21) e no passo 21 o vetor completo de estados $\tilde{\mathbf{x}}_i$ do TCR inicializado é montado através da seguinte concatenação:

$$\mathbf{x}_i = [\tilde{\mathbf{x}}_0 \ V_{rms0} \ V_{ref0} \ B_{tcr0} \ B_{n0} \ \alpha_0 \ \theta_{PLL0} \ \sigma_0]. \quad (5.16)$$

Para finalizar o processo de inicialização, de posse do vetor $\tilde{\mathbf{v}}_{\text{barra}0}$ das tensões em todas as barras do sistema, efetua-se o cálculo das correntes $\tilde{\mathbf{i}}_{km}$ nos elementos (ramos) e as

correntes históricas $\tilde{\mathbf{i}}'_{km}$ obtidas através das equações dos MAFDs (modelos de acompanhamento de fasores dinâmicos) descritas no Capítulo 3, de modo a obter-se o vetor $\tilde{\mathbf{i}}_d$ para o próximo passo de integração.

O processo de inicialização descrito até aqui foi implementado no simulador DPTS no MATLAB e os resultados da simulação comparativa com o PSCAD/EMTDC são apresentada a seguir. Para isto, foi utilizado o Sistema Teste 2c. O arquivo de dados do DPTS para este sistema é apresentado na Tabela B.5 e o diagrama na Figura B.4 do Apêndice B. Os valores adotados nesta simulação para os ganhos do controlador PI do controle de tensão do TCR foram $K_{P-PI} = 0,05$ e $K_{I-PI} = 1000$. A inicialização do TCR foi feita para um valor definido de $\alpha_0 = 120,02^\circ$.

Tabela 5.1 – Resultado da inicialização do TCR e da rede.

TENSÕES DE NÓS [kV]			CORRENTES RAMOS [kA]			VARIÁVEIS DO TCR	
No	REAL	IMAG.	CIRC	REAL	IMAG.		
1	408,248000	0,000000	1-2	0,515557	0,153298	Tensão (Re) [kV]	406,957236
2	408,247995	-0,000002	2-3	0,515557	0,153298	Tensão (Im) [kV]	-33,753892
3	411,715522	-11,661622	3-4	0,515557	0,153298	Corrente (Re) [kA]	-0,020987
4	407,649157	2,013947	4-0	0,000763	-0,154475	Corrente (Im) [kA]	-0,253033
5	406,568090	1,367624	4-5	0,514794	0,307773	V_{ref} [pu]	1,000261
6	413,767351	-23,595667	5-6	0,514794	0,307773	V_{rmsf} [pu]	1,000261
7	411,641763	-23,539573	6-7	0,506092	-0,013356	Susceptância B_{tcr} [pu]	-1,554422
8	403,188860	-47,609042	7-8	0,506092	-0,013356	Âng. de disparo α [rad]	2,094744
9	402,184555	-46,911150	8-9	0,478240	-0,332330	Âng. de referência θ [rad]	2,011642
10	406,957236	-33,753892	9-0	-0,017777	-0,152404	Âng. de condução σ [rad]	2,093697
11	145,823554	178,991052	9-10	0,496017	-0,179926		
12	2,879999	0,370464	10-11	0,474789	-0,386809		
13	0,051458	0,609334	11-0	0,474789	-0,386809		
			10-0	0,038175	0,460258		
			10-12	0,004041	-0,000341		
			12-13	0,004041	-0,000341		
			13-0	0,004041	-0,000341		

A Tabela 5.1 apresenta os resultados da inicialização do DPTS no MATLAB, que consistem nas componentes real e imaginária das tensões em todas as barras e correntes em todos os ramos do sistema, além das variáveis relativas ao TCR.

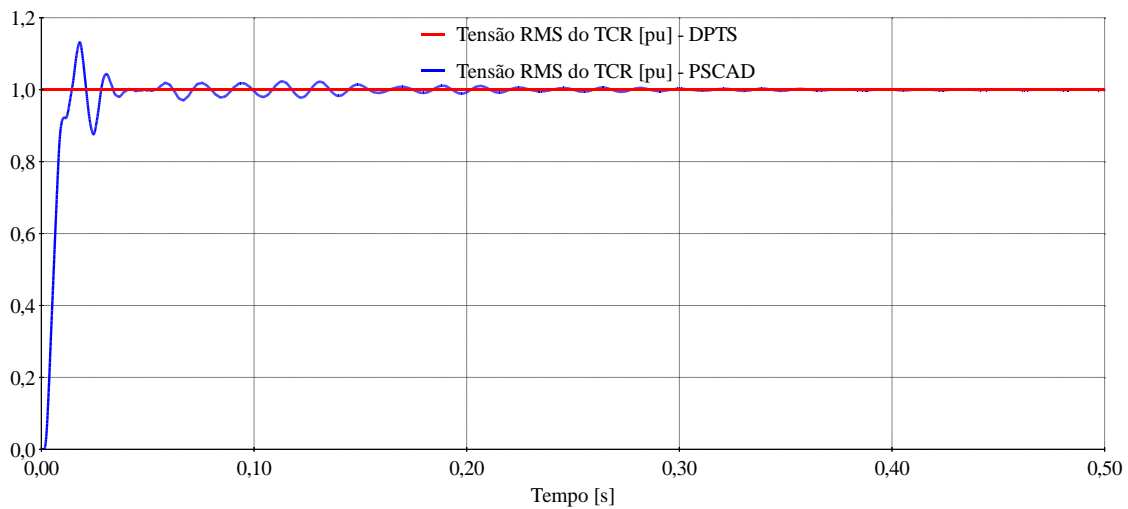


Figura 5.1 – Inicialização da tensão RMS do TCR.

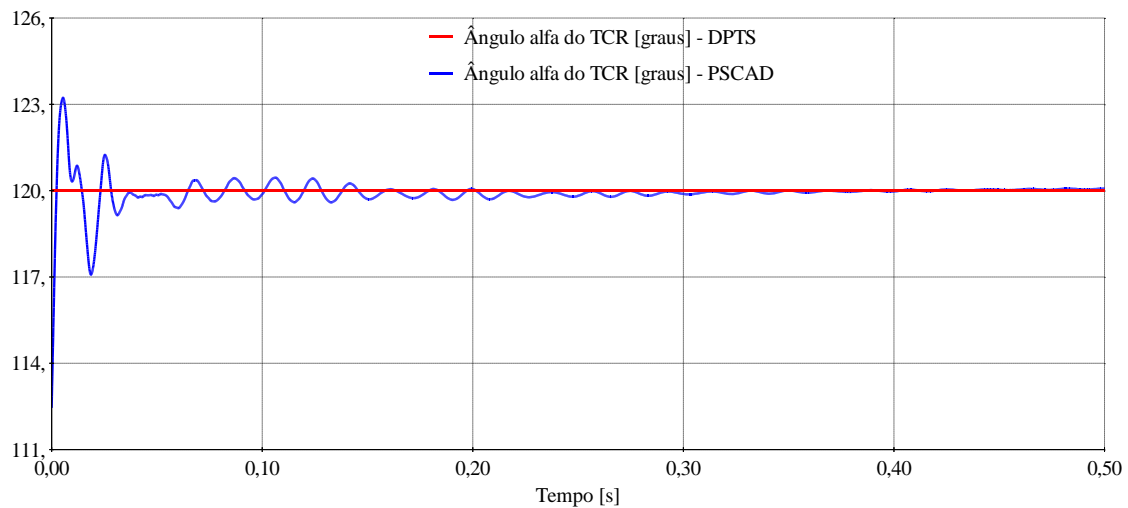


Figura 5.2 – Inicialização do ângulo de disparo do TCR.

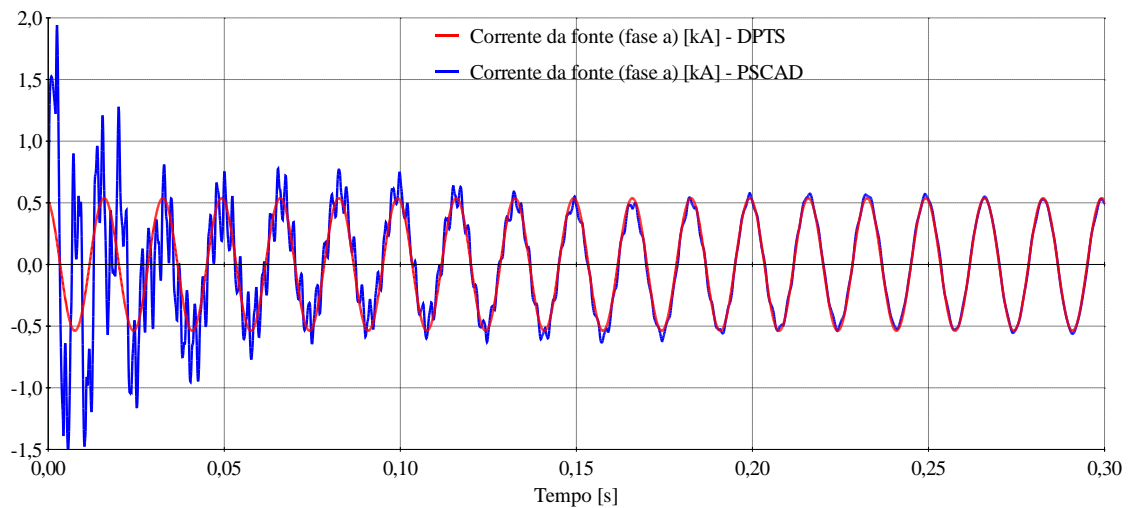


Figura 5.3 – Inicialização da Corrente da fonte (fase a).

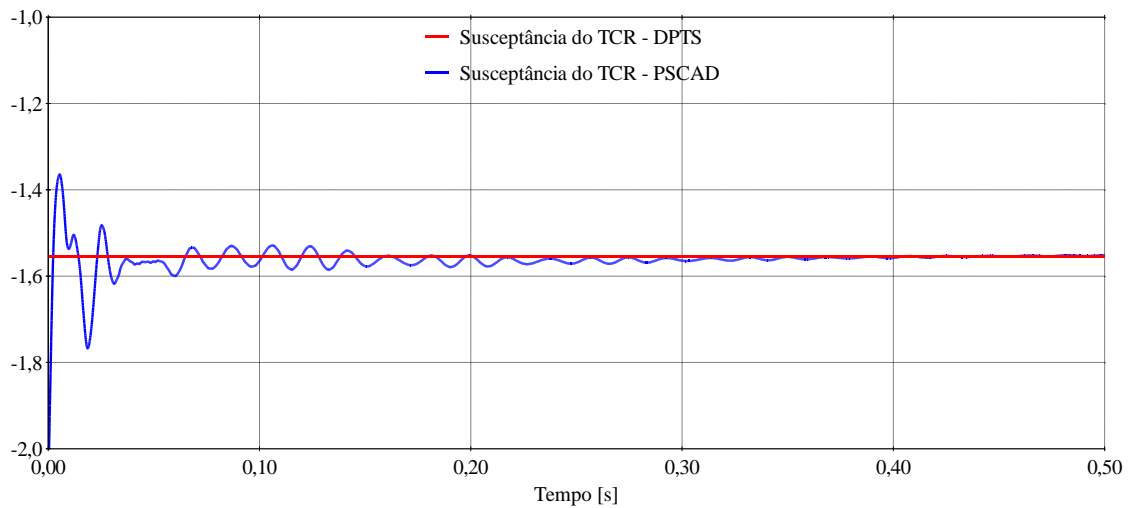


Figura 5.4 – Inicialização da susceptância do TCR.

Da Figura 5.1 até a Figura 5.4 são apresentados os resultados das comparações de algumas variáveis inicializadas no DPTS com as variáveis correspondentes simuladas no PSCAD para criação de um snapshot, os quais demonstram que o processo de inicialização implementado no MATLAB está correto e preciso.

5.2 Modelagem de elementos não-lineares

Considera-se inicialmente na Figura 5.5, de forma genérica, um modelo de equipamento não-linear conectado a uma rede elétrica linear.

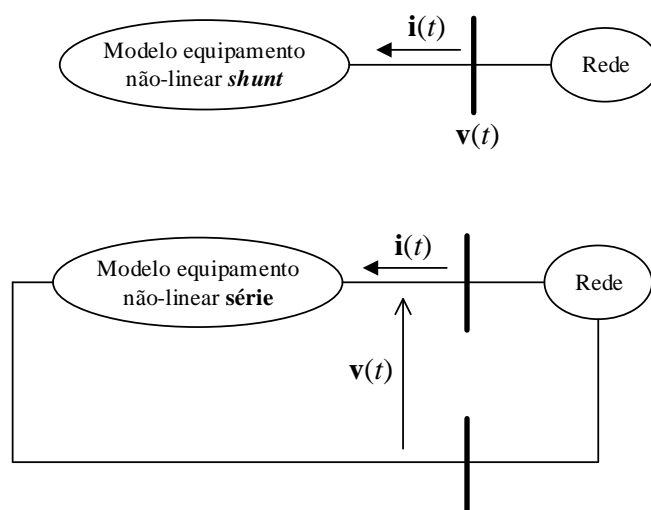


Figura 5.5 – Elemento não-linear *shunt* ou *série* conectado à rede.

No Capítulo 3, foram obtidos modelos de acompanhamento tensoriais os quais descrevem integralmente o comportamento dinâmico de elementos lineares da rede. Para equipamentos mais complexos, tais como FACTS e conversores de elos de corrente ou tensão contínua, o modelo é descrito por um sistema de equações envolvendo várias variáveis relacionadas ao dispositivo e aos seus controladores, e não apenas pelas tensões e correntes dos terminais.

Nesta seção, um modelo de acompanhamento tensorial linearizado é desenvolvido para integrar os elementos não lineares à parte linear da rede elétrica para a solução iterativa. Neste procedimento iterativo, o sistema de equações de cada dispositivo não linear é primeiramente resolvido separadamente considerando a primeira estimativa da tensão terminal. Em seguida, este modelo de acompanhamento linearizado é obtido e incluído na rede para a solução da mesma. Este procedimento (modelos e cálculos de rede) é então repetido até a convergência em cada passo da integração numérica.

Esta proposta de solução é alternada (equações de rede e de equipamentos solucionadas alternadamente) e modular, mas é numericamente equivalente à solução simultânea

proporcionada pelo método de Newton-Raphson devido ao modelo de acompanhamento linearizado utilizado. Sob um outro ponto de vista, este modelo também pode ser encarado alternativamente como uma interpretação elétrica para a aproximação de primeira ordem da Série de Taylor presente no método de Newton-Raphson [DIRECTOR 1975].

Um equipamento não-linear pode ser conectado a um único nó, entre dois nós ou até mesmo entre vários nós. Por razões de simplicidade e clareza, um dispositivo shunt ou série é considerado com correntes iguais nos terminais (Figura 5.5). No entanto, dispositivos multiportas podem ser generalizados a partir da formulação apresentada.

As seguintes equações descrevem as relações entre a tensão $\mathbf{v}(t)$ e a corrente $\mathbf{i}(t)$ do dispositivo em termos de um modelo de FD onde as equações diferenciais foram transformadas em equações algébricas utilizando-se a regra trapezoidal. As equações a seguir apresentam a relação da tensão com as variáveis internas $\mathbf{x}(t)$ do modelo de equipamento e a corrente do equipamento em função de $\mathbf{x}(t)$ e $\mathbf{v}(t)$.

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{B} \mathbf{v}(t) = 0, \quad (5.17)$$

$$\mathbf{i}(t) = \mathbf{C} \mathbf{x}(t), \quad (5.18)$$

onde $\mathbf{x}(t)$ é um vetor de variáveis do modelo do equipamento incluindo seus controladores (reguladores de tensão, PLLs, controladores de fluxo de potência, estabilizadores, dentre outros), $\mathbf{v}(t)$ é o vetor de FD harmônicos de tensão (componentes real e imaginária dos FD harmônicos) e $\mathbf{i}(t)$ é o vetor de FD harmônicos de corrente. Os elementos não-lineares produzirão harmônicos, portanto geralmente existem FD harmônicos, mas eles são desprezados ao se utilizar modelos de frequência fundamental. Em estudos de ajuste de controladores, os modelos de frequência fundamental podem ser utilizados fornecendo resultados bastante satisfatórios [LIRIO 2007b], [GOMES 2009b]. As equações podem ser linearizadas utilizando-se vetores diferenciais:

$$\mathbf{J} \mathbf{dx}(t) + \mathbf{B} \mathbf{dv}(t) = 0, \quad (5.19)$$

$$\mathbf{di}(t) = \mathbf{C} \mathbf{dx}(t), \quad (5.20)$$

onde \mathbf{J} é a matriz Jacobiana composta pelas derivadas parciais de \mathbf{f} em relação a cada variável do vetor \mathbf{x} . Assumindo-se que a tensão e a corrente são variáveis internas do

vetor \mathbf{x} , \mathbf{B} e \mathbf{C} são matrizes compostas por elementos com valor “0” e “1” em posições adequadas objetivando ligar, respectivamente, a tensão interna com a tensão de entrada \mathbf{v} e a corrente interna com a corrente de saída \mathbf{i} . A relação entre os vetores diferenciais de corrente e tensão pode então ser obtida definindo-se uma matriz de sensibilidade $\mathbf{S}(t)$:

$$\mathbf{di}(t) = \mathbf{C}(\mathbf{J}(\mathbf{x}(t))^{-1} \mathbf{B}) \mathbf{dv}(t) = \mathbf{S}(t) \mathbf{dv}(t). \quad (5.21)$$

A matriz de sensibilidades $\mathbf{S}(t)$ representa as sensibilidades entre as componentes dos vetores de FD de tensão e corrente. O método de Newton-Raphson pode então ser aplicado em (5.21) para a solução da rede:

$$\mathbf{i}(t)^{(i+1)} - \mathbf{i}(t)^{(i)} = \mathbf{S}(t)^{(i)} [\mathbf{v}(t)^{(i+1)} - \mathbf{v}(t)^{(i)}], \quad (5.22)$$

onde i é o índice relativo às iterações para convergência da corrente como uma função da tensão corrigida. Para a solução da rede, a matriz de sensibilidades é calculada com os valores convergidos do vetor \mathbf{x} na solução anterior de (5.17) e (5.18) onde \mathbf{v} foi a variável de entrada, conforme dado por:

$$\mathbf{S}(t)^{(i)} = \mathbf{C}(\mathbf{J}(\mathbf{x}(t)^{(i)})^{-1} \mathbf{B}). \quad (5.23)$$

A partir de (5.23), obtém-se:

$$\mathbf{i}(t)^{(i+1)} = \mathbf{S}(t)^{(i)} \mathbf{v}(t)^{(i+1)} + \mathbf{i}_s(t)^{(i)}, \quad (5.24)$$

$$\mathbf{i}_s(t)^{(i)} = \mathbf{i}(t)^{(i)} - \mathbf{S}(t)^{(i)} \mathbf{v}(t)^{(i)}, \quad (5.25)$$

Denominaremos (5.24) e (5.25) de Modelo Linearizado de Acompanhamento (MLA), cuja representação gráfica é mostrada na Figura 5.6, que é uma forma análoga àquelas obtidas para os elementos lineares da rede. Visando evitar uma possível confusão por parte do leitor, julga-se importante salientar neste momento que, embora o MLA tenha uma forma a qual aparentemente se assemelha àquela de [DOMMEL 1969], tal fonte de corrente $\mathbf{i}_s(t)^{(i)}$ não representa um “termo histórico” (informações passadas em relação ao tempo simulado) mas sim um termo que depende apenas dos valores de $\mathbf{v}(t)$ e $\mathbf{i}(t)$ da iteração anterior i .

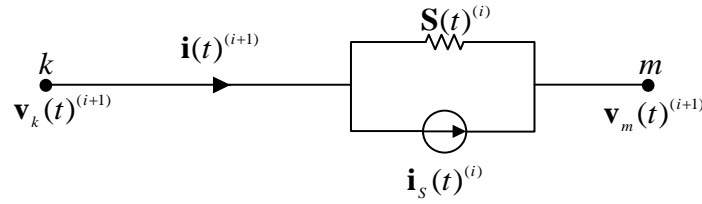


Figura 5.6 – MLA para um elemento não-linear.

Para este elemento não linear, a matriz de sensibilidade $\mathbf{S}(t)$ não é diagonal, o que significa que FD com diferentes frequências estão relacionadas entre si e a rede deve ser resolvida para os harmônicos considerados de forma simultânea, o que penalizaria consideravelmente a eficiência computacional do algoritmo. Uma forma de melhorar computacionalmente o método seria pela utilização do Método da Compensação [DOMMEL 1971] onde as matrizes de condutância nodal para cada harmônico poderiam ser reduzidas a matrizes equivalentes de dimensão correspondente aos nós terminais, reduzindo significativamente as dimensões do sistema matricial a ser resolvido.

No entanto a solução mais eficiente que está sendo proposta neste trabalho foi a que utiliza o método *Quasi-Newton* cuja base matemática é utilizar uma matriz jacobiana simplificada que não prejudique o desempenho da convergência e ao mesmo tempo aumente a eficiência computacional do método [SOLOMON 2015], [NOCEDAL 2006]. Neste trabalho a simplificação utilizada foi considerar apenas as sensibilidades de mesma frequência, ou seja, os blocos 2x2 próximos da diagonal principal da matriz de sensibilidades, desprezando-se os demais elementos. Neste caso, cada solução de rede harmônica poderia ser calculada de forma independente. Portanto o modelo da Figura 5.7 pode ser usado para cada frequência, onde a matriz $\bar{\mathbf{S}}(t)^{(i)}$ é dada por (5.26).

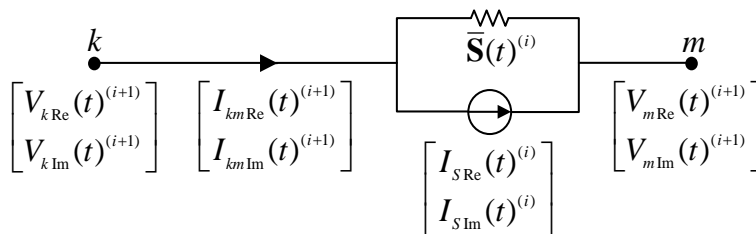


Figura 5.7 – MLA de cada frequência para um elemento não-linear.

$$\bar{\mathbf{S}}(t)^{(i)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial I_{km\text{Re}}(t)^{(i)}}{\partial V_{km\text{Re}}(t)^{(i)}} & \frac{\partial I_{km\text{Re}}(t)^{(i)}}{\partial V_{km\text{Im}}(t)^{(i)}} \\ \frac{\partial I_{km\text{Im}}(t)^{(i)}}{\partial V_{km\text{Re}}(t)^{(i)}} & \frac{\partial I_{km\text{Im}}(t)^{(i)}}{\partial V_{km\text{Im}}(t)^{(i)}} \end{bmatrix}. \quad (5.26)$$

Neste caso, para que a solução matemática não seja alterada, a corrente da fonte deve ser calculada em função da matriz de sensibilidade utilizada, de forma que a corrente injetada na rede corresponda exatamente à corrente do elemento não linear:

$$\mathbf{i}_s(t)^{(i)} = \mathbf{i}(t)^{(i)} - \bar{\mathbf{S}}(t)^{(i)} \mathbf{v}(t)^{(i)}, \quad (5.27)$$

5.3 Exemplo de aplicação do MLA

Com o objetivo de demonstrar a eficácia do método de solução desacoplada entre sistema linear e não-linear utilizando o MLA, foi elaborado o seguinte caso exemplo de um circuito monofásico alimentado por uma fonte de tensão contínua da Figura 5.8, onde o resistor R_1 representa a resistência interna da fonte e o resistor R_{NL} é um resistor não-linear, cujo comportamento elétrico obedece à seguinte equação:

$$i(t) = k_1 v(t) + k_2 v^7(t), \quad (5.28)$$

onde as constantes k_1 e k_2 tem os seguintes valores,

$$k_1 = 1 \text{ [A/V]} \text{ e } k_2 = \frac{1}{2} \text{ [A/V}^7\text{]}. \quad (5.29)$$

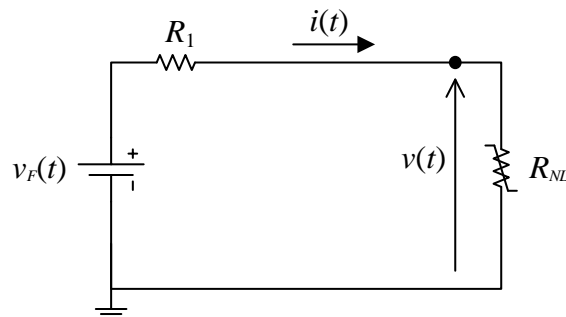


Figura 5.8 – Circuito com resistor não-linear.

As equações que descrevem o comportamento do circuito contendo resistor não-linear da Figura 5.8 são:

$$v_F(t) = R_1 i(t) + v(t), \quad (5.30)$$

$$i(t) = f(v) = k_1 v(t) + k_2 v^7(t). \quad (5.31)$$

Como este sistema possui equações algébricas lineares e não-lineares, a solução do mesmo para $v_F=2V$ e $R_1=0,15 \Omega$ pode ser obtida através de um método numérico [RUGGIERO 1996], [STARK 1979] onde as equações que descrevem o sistema são resolvidas simultaneamente pelo método de Newton Raphson ou pela solução alternada das equações lineares e não-lineares utilizando o método de Gauss-Seidel [FRANCO 2006]. Na Figura 5.9 é mostrada a solução gráfica obtida através de simulação no MATLAB, que corresponde exatamente ao ponto de interseção entre as duas curvas oriundas das equações que descrevem o sistema. A curva em vermelho corresponde à equação do resistor não-linear e a curva em azul corresponde à equação da parte linear do circuito.

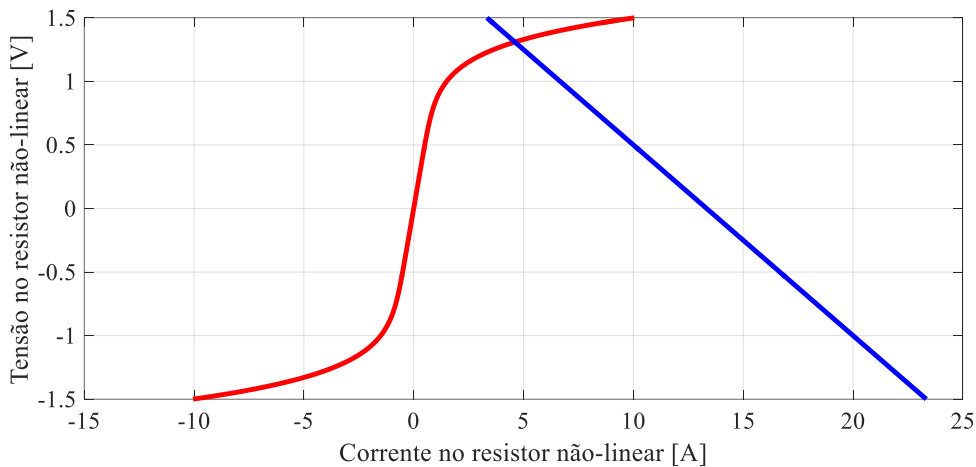


Figura 5.9 – Solução gráfica do circuito com resistor não-linear.

São apresentados a seguir três métodos de solução para este sistema e a comparação das convergências de tais métodos.

a) Método Simultâneo

Para solucionar o sistema pelo método de Newton-Raphson, tem-se:

$$g_1(v, i) = R_1 i + v - v_F, \quad (5.32)$$

$$g_2(v, i) = k_1 v + k_2 v^7 - i. \quad (5.33)$$

O incremento $\Delta g = -g(v, i)$ pode ser aproximado pela diferencial total:

$$\frac{\partial g_1(v, i)}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial g_1(v, i)}{\partial i} \Delta i = -g_1(v, i), \quad (5.34)$$

$$\frac{\partial g_2(v, i)}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial g_2(v, i)}{\partial i} \Delta i = -g_2(v, i), \quad (5.35)$$

onde,

$$\frac{\partial g_1}{\partial v} = 1; \quad \frac{\partial g_1}{\partial i} = R_1; \quad \frac{\partial g_2}{\partial v} = k_1 + 7k_2 v^6; \quad \frac{\partial g_2}{\partial i} = -1.$$

Escrevendo em forma matricial,

$$\begin{bmatrix} 1 & R_1 \\ k_1 + 7k_2 v^6 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v \\ \Delta i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g_1 \\ -g_2 \end{bmatrix} \therefore \begin{bmatrix} \Delta v \\ \Delta i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_1 \\ k_1 + 7k_2 v^6 & -1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -g_1 \\ -g_2 \end{bmatrix} \therefore \Delta \mathbf{x} = \mathbf{J}^{-1} \mathbf{g} \quad (5.36)$$

O algoritmo para a solução é descrito no Algoritmo 5.2, onde \mathbf{J} é a matriz Jacobiana dada por (5.36).

Algoritmo 5.2 – Método Simultâneo (Newton-Raphson).

Início

Enquanto erro > 1E-10 faça:

 Cálculo a matriz Jacobiana (\mathbf{J}) em função de v e i ;

 Cálculo do vetor de funções (\mathbf{g}) em função de v e i ;

 Cálculo de Δv e Δi ($\Delta \mathbf{x} = \mathbf{J}^{-1} \mathbf{g}$);

 Incremento na corrente ($i = i + \Delta i$);

 Incremento na tensão ($v = v + \Delta v$);

 erro = MÁX $\{|\Delta v|, |\Delta i|\}$;

Fim.

Implementando-se este algoritmo de solução simultânea por Newton-Raphson no MATLAB, tem-se os resultados de simulação na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultado das iterações para a solução simultânea.

ITERAÇÃO	v [V]	i [A]	Erro
1	1,73913043	1,73913043	1,739130
2	1,50890921	3,27393858	0,230221
3	1,36313297	4,24578017	0,145776
4	1,31366789	4,57554743	0,049465
5	1,30922965	4,60513567	0,004438
6	1,30919784	4,60534775	3,18E-05
7	1,30919784	4,60534776	1,62E-09
8	1,30919784	4,60534776	1,76E-17

Observa-se na Tabela 5.2 que para este sistema contendo o resistor não-linear o método de Newton-Raphson convergiu e os valores encontrados para a tensão e a corrente foram respectivamente 1,30919784 V e 4,60534776 A.

b) Método Alternado

Para solucionar o sistema pelo método de Gauss-Seidel [FRANCO 2006], soluciona-se as equações da rede e do resistor linear de forma consecutiva em um laço e verifica-se se o erro obtido está abaixo de uma determinada tolerância, conforme indicado no Algoritmo 5.3, onde as tensões anterior e atual são aquelas relativas à iteração anterior e atual respectivamente.

Algoritmo 5.3 – Método Alternado de solução (Gauss-Seidel).

Início

Enquanto erro > 1E-10 faça:

tensão anterior = tensão atual;

Cálculo da corrente em função da tensão atual ($i = k_1 v + k_2 * v^7$);

Cálculo da tensão em função da corrente ($v = v_F - R_I * i$);

erro = |tensão atual – tensão anterior|;

Fim.

Implementando-se este algoritmo de solução alternada por Gauss-Seidel no MATLAB, tem-se os resultados de simulação mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Resultado das iterações para a solução alternada.

ITERAÇÃO	v [V]	i [A]	Erro
1	2,0	0	2
2	7,9	66	9,9
3	1,44E+05	-9,60E+05	144040
4	9,64E+03	6,43E+35	9,64E+34
5	5,82E+243	3,88E+244	5,82E+243
6	∞	∞	∞

Observa-se na Tabela 5.3 que para este sistema contendo o resistor não-linear o método de Gauss-Seidel divergiu, o que mostra a importância do método de Newton-Raphson, o qual além de convergir, o fez de forma rápida com redução quadrática do erro.

c) Método Alternado com sensibilidades

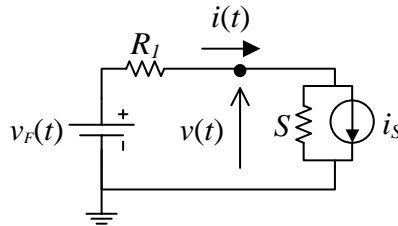


Figura 5.10 – MLA para o resistor não-linear.

$$S = \frac{di}{dv} = k_1 + 7k_2 v^6, \quad (5.37)$$

$$i_s = i - \frac{di}{dv} v = i - Sv. \quad (5.38)$$

Para solucionar o sistema pelo método de Gauss-Seidel considerando o MLA, calcula-se a equação do resistor linear, em seguida calcula-se a condutância de sensibilidade (5.37) e a fonte de corrente (5.38), e após soluciona-se a rede (Figura 5.10) considerando o modelo linearizado e finalmente verifica-se se o erro obtido está abaixo de uma determinada tolerância, conforme indicado no Algoritmo 5.4.

Algoritmo 5.4 – Método Alternado com MLA.

Início

Enquanto erro > 1E-10 faça:

tensão anterior = tensão atual;

Cálculo da corrente em função da tensão atual ($i = k_1 v + k_2 * v^7$);

Cálculo da condutância ($S = k_1 + k_2 * 7 * v^6$);

Cálculo da fonte de corrente ($i_S = i - S * v$);

Solução da rede ($v = (v_F / R_I - i_S) / (1 / R_I + S)$);

erro = |tensão atual – tensão anterior|;

Fim.

Tabela 5.4 – Resultado das iterações para a solução alternada com MLA.

ITERAÇÃO	v [V]	i [A]	Erro
1	1,73913043	0	1,739130
2	1,50890921	25,79910099	0,230221
3	1,36313297	10,41345508	0,145776
4	1,31366789	5,73571102	0,049465
5	1,30922965	4,68940863	0,004438
6	1,30919784	4,60594029	3,18E-05
7	1,30919784	4,60534779	1,62E-09
8	1,30919784	4,60534776	2,22E-16

Implementando-se este algoritmo de solução alternada por Gauss-Seidel com MLA no MATLAB, tem-se os resultados de simulação mostrados na Tabela 5.4.

Tabela 5.5 – Comparativo entre os três métodos de solução.

ITER	SIMULTÂNEO		ALTERNADO COM MLA		ALTERNADO SEM MLA
	$v(t)$	Erro	$v(t)$	Erro	Erro
1	1,739130	1,739130	1,73913	1,739130	2,00
2	1,508909	0,230221	1,508909	0,230221	9,90
3	1,363133	0,145776	1,363133	0,145776	144040,00
4	1,313668	0,0494651	1,313668	0,049465	9,64461E+34
5	1,309230	0,00443824	1,30923	0,004438	5,82177E+243
6	1,309198	3,18121E-05	1,309198	3,18121E-05	∞
7	1,309198	1,61614E-09	1,309198	1,61614E-09	∞

A Tabela 5.5 mostra o comparativo entre os 3 métodos, onde observa-se que a solução alternada com MLA convergiu com redução quadrática do erro de maneira idêntica ao método simultâneo confirmando assim o que foi afirmado na seção anterior.

5.4 DPTS incluindo indutor tratado como TRC com solução pelo método alternado

Uma vez incluído na rotina do DPTS no MATLAB os algoritmos de solução do TCR (conforme metodologia indicada no Apêndice A), foi implementado um modelo para um indutor fixo a ser colocado no lugar do TCR, mas na mesma estrutura de solução deste de modo a verificar o correto funcionamento das rotinas de solução pelos métodos alternados com e sem o MLA.

5.4.1 Método alternado sem MLA

Para solucionar o sistema pelo método de Gauss-Seidel [FRANCO 2006], ou seja, uma solução alternada sem a utilização do MLA, implementou-se o seguinte algoritmo no MATLAB.

Algoritmo 5.5 – DPTS com indutor fixo (método alternado sem MLA).

01	Início;
02	Leitura de dados;
03	Inicializações;
04	Montagem da matriz \mathbf{G}_{bus} ;
05	Para t de 0 a T_{max} faça:
06	Verificação da ocorrência de chaveamentos e modificação de \mathbf{G}_{bus} ;
07	Enquanto <i>erro</i> > tolerância faça:
08	Execução da rotina CALC_IND (calcula \mathbf{x}_f);
09	Montagem do vetor de correntes do indutor ($\tilde{\mathbf{i}}_{ind}$);
10	Eliminação das posições das fontes de tensão no vetor $\tilde{\mathbf{i}}_{ind}$;
11	Atualização das tensões conhecidas $\tilde{\mathbf{v}}_c$ das fontes (geradores);
12	Solução do sistema linear (incluindo $\tilde{\mathbf{i}}_{ind}$) obtendo tensões desconhecidas ($\tilde{\mathbf{v}}_d$);
13	Atualização das tensões das barras;
14	Atualização do erro;
15	Atualização da tensão terminal do indutor ($\tilde{\mathbf{u}}$);

```

16      Fim.
17      Execução da rotina CALCULACOR ( $\tilde{\mathbf{i}}_{km}$ ,  $\tilde{\mathbf{i}}_{kmh}$  e  $\tilde{\mathbf{i}}_d$ );
18      Fim.
19      Plotagem das curvas no tempo;
20 Fim.

```

No Algoritmo 5.5, o passo 02 consiste na leitura do arquivo em formato texto (conforme formato da Tabela B.1). O passo 03 consiste nas rotinas de inicialização da rede. O passo 04 consiste na montagem da matriz de condutâncias de barras \mathbf{G}_{bus} conforme (4.3). No passo 05 inicia-se o laço de tempo, onde o tempo simulado varia de 0 até o valor T_{max} . No passo 06 a matriz \mathbf{G}_{bus} é adequadamente modificada caso verifique-se a ocorrência de algum chaveamento naquele instante da simulação no tempo, conforme explicado no Algoritmo 4.1. No passo 07 inicia-se o laço de solução alternada por Gauss-Seidel da rede e indutor L_{ind} .

No passo 08 a rotina CALC_IND é executada, onde o vetor \mathbf{x}_f de variáveis do indutor (que inclui as injeções de corrente deste indutor na rede) é calculado. Nos passos 09 e 10 são realizadas respectivamente a montagem do vetor $\tilde{\mathbf{i}}_{ind}$ de correntes do indutor e a eliminação das posições das fontes de tensão neste vetor. No passo 11 os fasores dinâmicos das tensões das fontes $\tilde{\mathbf{v}}_c$ (geradores) são calculados utilizando-se (4.15).

No passo 12 o sistema linear (4.9) é solucionado para a obtenção das tensões desconhecidas $\tilde{\mathbf{v}}_d$, incluindo-se nesta solução as injeções de corrente do TCR. Nos passos 13 a 15 são respectivamente atualizadas as tensões das barras (vetores $\tilde{\mathbf{v}}_c$ e $\tilde{\mathbf{v}}_d$), o erro relativo ao laço de solução alternada e o vetor $\tilde{\mathbf{u}}$ da tensão terminal do indutor. Findado o laço de solução alternada rede-TCR, é executada a rotina CALCULACOR no passo 17 onde, de posse dos valores previamente calculados das tensões nas barras, as correntes injetadas nas barras da rede e as correntes nos elementos da rede são calculadas conforme as equações (3.11), (3.28), (3.44) e (3.62)-(3.69). Findado o laço principal de tempo (passo 06), as curvas no tempo são plotadas no passo 19 exibindo-se assim os resultados da simulação.

Salienta-se que este algoritmo foi um passo intermediário de implementação e foi importante na depuração de erros do programa. É importante salientar que o Algoritmo 5.5 ainda não contempla o Modelo Linearizado de Acompanhamento (sensibilidades) na solução. As equações e rotinas que modelam o indutor fixo (tratado como TCR) e os resultados de simulação comprovando que tais rotinas estão funcionando corretamente no MATLAB são mostrados a seguir.

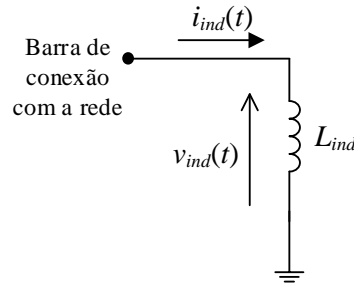


Figura 5.11 – Indutor inserido no DPTS no lugar do TCR.

A equação que descreve o comportamento do indutor da Figura 5.11 é:

$$L_{ind} \frac{di_{ind}(t)}{dt} = v_{ind}(t). \quad (5.39)$$

Substituindo-se a tensão e a corrente de (5.39) pelos seus respectivos fasores dinâmicos (3.13) e (3.14), tem-se:

$$L_{ind} \frac{dI_{ind\text{ Re}}(t)}{dt} - \omega L_{ind} I_{ind\text{ Im}}(t) = V_{ind\text{ Re}}(t), \quad (5.40)$$

$$\omega L_{ind} I_{ind\text{ Re}}(t) + L_{ind} \frac{dI_{ind\text{ Im}}(t)}{dt} = V_{ind\text{ Im}}(t). \quad (5.41)$$

Escolhendo-se o vetor de estados,

$$\mathbf{x}_f = [V_{ind\text{ Re}}(t) \quad V_{ind\text{ Im}}(t) \quad I_{ind\text{ Re}}(t) \quad I_{ind\text{ Im}}(t)]^T, \quad (5.42)$$

E a tensão do indutor como saída,

$$\tilde{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} V_{ind\text{ Re}}(t) \\ V_{ind\text{ Im}}(t) \end{bmatrix}, \quad (5.43)$$

Podemos escrever (5.40) e (5.41) na forma de sistemas descritores [LIMA 1999]:

$$\mathbf{T}_{\text{ind}} \dot{\mathbf{x}}_f = \mathbf{A}_{\text{ind}} \mathbf{x}_f + \mathbf{B}_{\text{ind}} \tilde{\mathbf{u}}, \quad (5.44)$$

onde,

$$\mathbf{T}_{\text{ind}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{A}_{\text{ind}} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ L_{\text{ind}}^{-1} & 0 & 0 & \omega \\ 0 & L_{\text{ind}}^{-1} & -\omega & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_{\text{ind}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ L_{\text{ind}}^{-1} & 0 \\ 0 & L_{\text{ind}}^{-1} \end{bmatrix}. \quad (5.45)$$

Aplicando-se a regra trapezoidal (3.3) na equação (5.44):

$$\mathbf{T}_{\text{ind}} \frac{\mathbf{x}_f(t) - \mathbf{x}_f(t - \Delta t)}{\Delta t} = \mathbf{A}_{\text{ind}} \frac{\mathbf{x}_f(t) + \mathbf{x}_f(t - \Delta t)}{2} + \mathbf{B}_{\text{ind}} \frac{\tilde{\mathbf{u}}(t) + \tilde{\mathbf{u}}(t - \Delta t)}{2}, \quad (5.46)$$

$$\mathbf{x}_f(t) = \left[\frac{2\mathbf{T}_{\text{ind}}}{\Delta t} - \mathbf{A}_{\text{ind}} \right]^{-1} \left[\left(\frac{2\mathbf{T}_{\text{ind}}}{\Delta t} + \mathbf{A}_{\text{ind}} \right) \mathbf{x}_f(t - \Delta t) + \mathbf{B}_{\text{ind}} (\tilde{\mathbf{u}}(t) + \tilde{\mathbf{u}}(t - \Delta t)) \right], \quad (5.47)$$

Através de (5.47) é possível calcular no passo 08 do Algoritmo 5.5 (rotina CALC_IND) o vetor de estados para o tempo atual $\mathbf{x}_f(t)$ (injeções de corrente) pois as matrizes \mathbf{T}_{ind} , \mathbf{A}_{ind} e \mathbf{B}_{ind} são constantes, os vetores $\mathbf{x}_f(t - \Delta t)$ e $\tilde{\mathbf{u}}(t - \Delta t)$ são valores do tempo anterior (conhecidos) e $\tilde{\mathbf{u}}(t)$ é o vetor de entrada do tempo atual, o qual também é um valor conhecido, pois é a tensão da barra de conexão do indutor com a rede (calculada no passo 12 deste mesmo algoritmo).

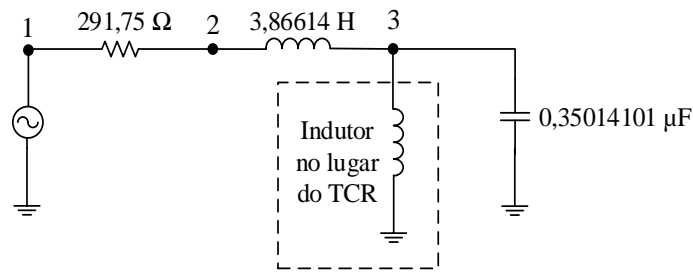


Figura 5.12 – Sistema Teste 3a representado no DPTS – Indutor no lugar do TCR.

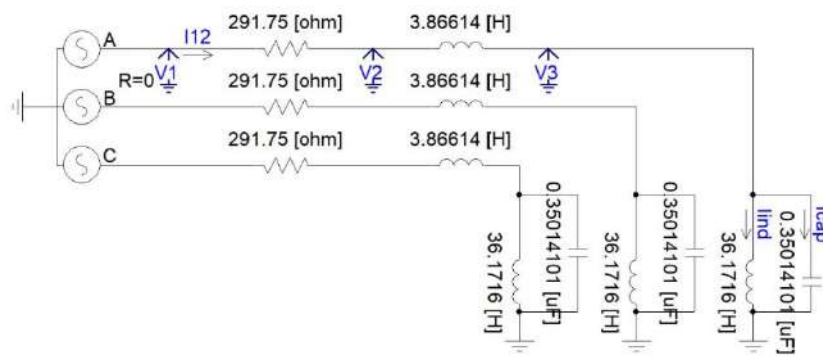


Figura 5.13 – Sistema Teste 3a representado no PSCAD.

A Figura 5.12 mostra a rede simples (Sistema Teste 3a) que foi utilizada para validação do Algoritmo 5.5 implementado no MATLAB. Nesta rede, o indutor modelado conforme (5.47) foi inserido em uma rede simples de três barras. O arquivo de dados do DPTS para este sistema consta no Apêndice B (Tabela B.6). Na Figura 5.13 é mostrado o mesmo sistema, porém representado no PSCAD/EMTDC. O passo de integração utilizado nestas simulações foi de $50 \mu s$ em ambos os programas. A fonte de tensão constante possui frequência de 60 Hz e tensão RMS igual a 500 kV. O evento simulado foi a energização do sistema (conexão da fonte) em $t=0$.

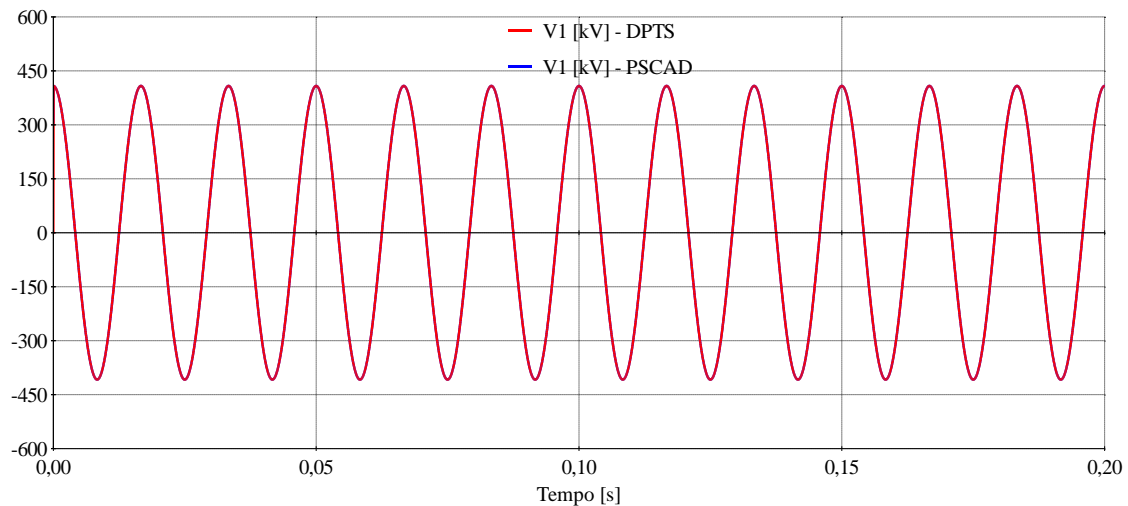


Figura 5.14 – Comparação MATLAB e PSCAD da tensão na barra 1.

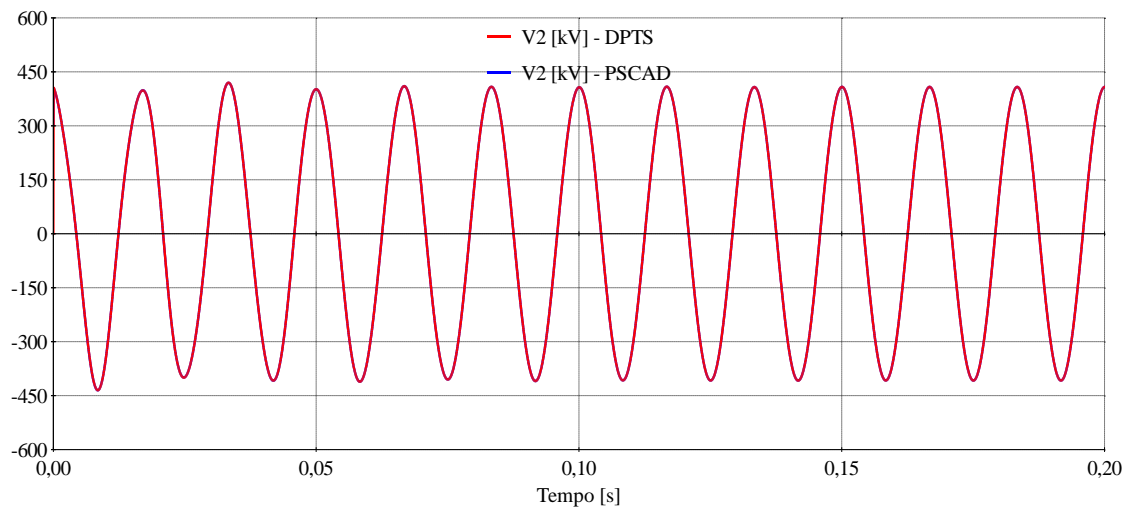


Figura 5.15 – Comparação DPTS e PSCAD da tensão na barra 2.

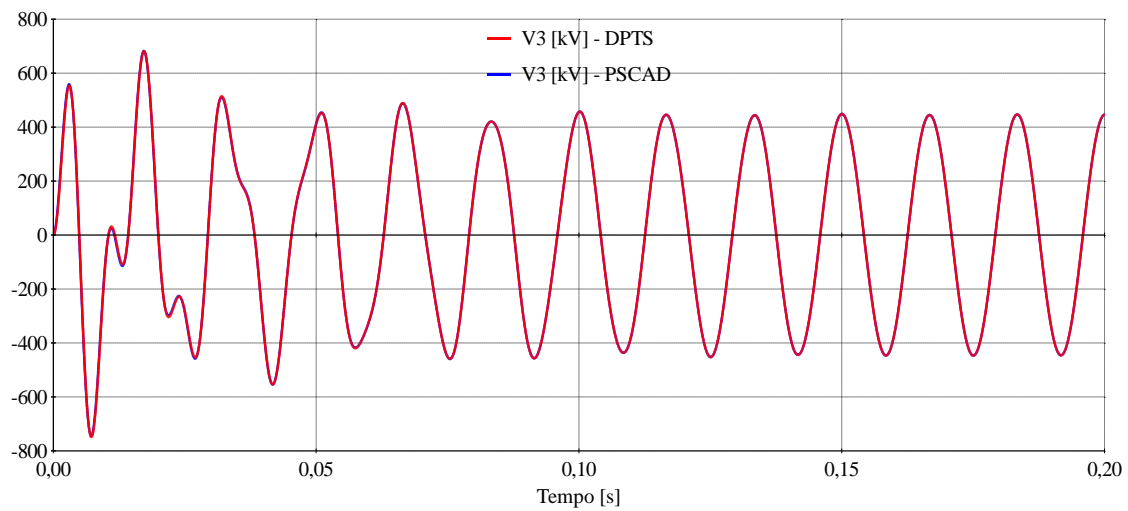


Figura 5.16 – Comparação DPTS e PSCAD da tensão na barra 3.

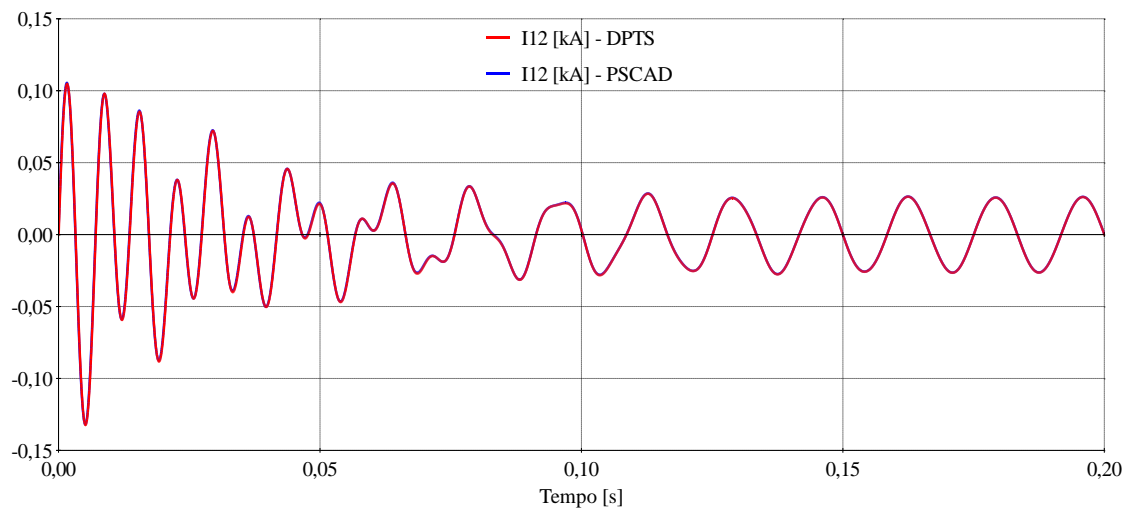


Figura 5.17 – Comparação DPTS e PSCAD da corrente na fonte.

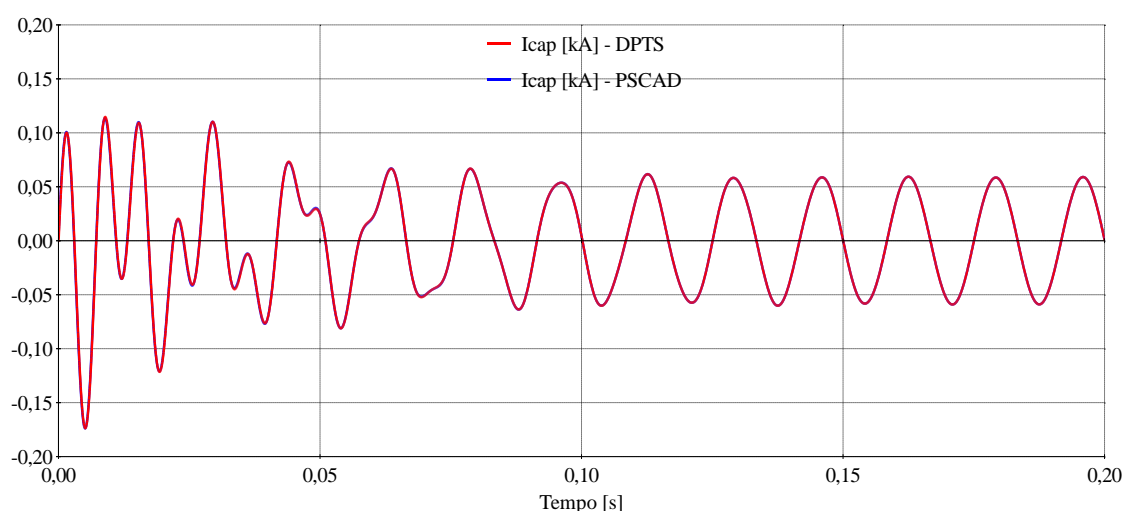


Figura 5.18 – Comparação DPTS e PSCAD da corrente no capacitor.

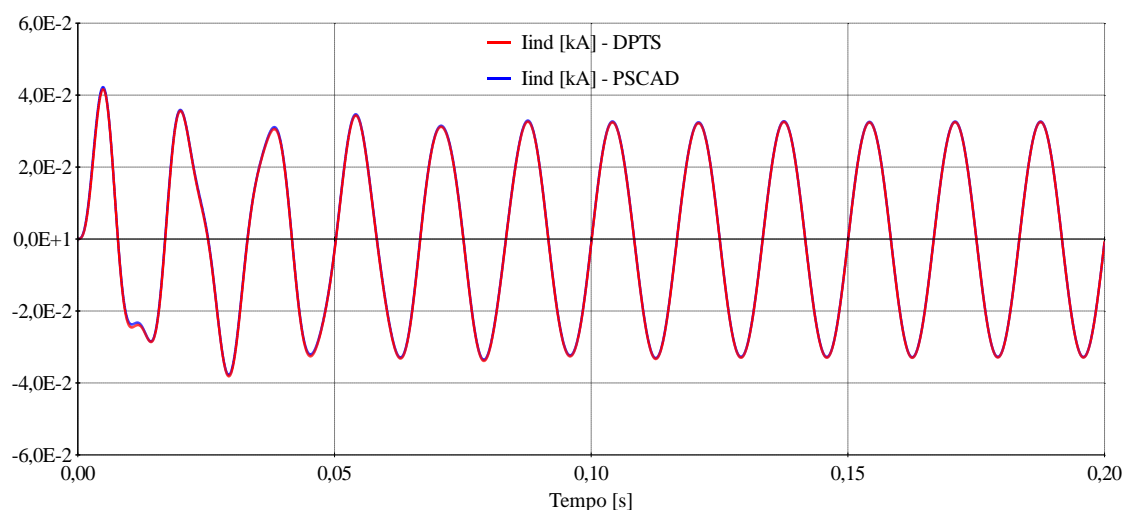


Figura 5.19 – Comparação DPTS e PSCAD da corrente do indutor (inserido no lugar do TCR).

Observando-se dos resultados das simulações (Figura 5.14 a Figura 5.19), verifica-se que as curvas do DPTS e do PSCAD são praticamente coincidentes, o que comprova que o método de solução alternada está adequadamente implementado.

5.4.2 Método alternado com MLA

Para solucionar o sistema utilizando uma solução alternada e com a utilização do Modelo Linearizado de Acompanhamento, implementou-se o seguinte algoritmo no MATLAB, onde estão destacados em vermelho as diferenças em relação ao método sem MLA implementado anteriormente.

Algoritmo 5.6 – DPTS com indutor fixo (método alternado com MLA).

```

01 Início:
02   Leitura de dados;
03   Inicializações;
04   Montagem da matriz  $\mathbf{G}_{bus}$ ;
05   Para  $t$  de 0 a  $T_{max}$  faça:
06     Verificação da ocorrência de chaveamentos e modificação de  $\mathbf{G}_{bus}$ ;
07     Enquanto  $erro > tolerância$  faça:
08       Execução da rotina CALC_IND (calcula  $\mathbf{x}_f$ );
09       Atualização das tensões conhecidas  $\tilde{\mathbf{v}}_c$  das fontes (geradores);
10       Cálculo da matriz de sensibilidade  $\mathbf{S}_{ind}$ ;
11       Modificação de  $\mathbf{G}_{bus}$  para incluir a matriz de sensibilidades 2x2;
12       Monta vetor  $\tilde{\mathbf{i}}_{Nind}$  de correntes de acompanhamento;
13       Eliminação das posições das fontes de tensão no vetor  $\tilde{\mathbf{i}}_{Nind}$ ;
14       Solução do sistema linear para obter  $\tilde{\mathbf{v}}_d$  (considerando  $\tilde{\mathbf{i}}_{ind}$  e  $\tilde{\mathbf{i}}_{Nind}$ );
15       Atualização das tensões das barras;
16       Atualização do erro;
17       Atualização da tensão terminal  $\tilde{\mathbf{u}}$  do indutor;
18     Fim.
19     Execução da rotina CALCULACOR ( $\tilde{\mathbf{i}}_{km}, \tilde{\mathbf{i}}_{kmh}$  e  $\tilde{\mathbf{i}}_d$ );
20   Fim.
21   Plotagem das curvas no tempo;
22 Fim.

```

No Algoritmo 5.6 as linhas em vermelho indicam os passos que foram adicionados ou modificados no algoritmo para consideração do MLA. No passo 10, é montada a matriz de sensibilidades \mathbf{S}_{ind} . Escolhendo-se a corrente como saída no sistema descritor:

$$\tilde{\mathbf{i}}_{ind} = \mathbf{C}_{ind} \mathbf{x}_f + \mathbf{D}_{ind} \tilde{\mathbf{u}}, \quad (5.48)$$

onde,

$$\mathbf{C}_{ind} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{D}_{ind} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \tilde{\mathbf{i}}_{ind} = \begin{bmatrix} I_{ind\ Re}(t) \\ I_{ind\ Im}(t) \end{bmatrix}, \quad (5.49)$$

Juntando-se (5.44) com (5.48) obtém-se o sistema descritor completo:

$$\begin{cases} \mathbf{T}_{ind} \dot{\mathbf{x}}_f(t) = \mathbf{A}_{ind} \mathbf{x}_f(t) + \mathbf{B}_{ind} \tilde{\mathbf{u}}(t) \\ \tilde{\mathbf{i}}_{ind}(t) = \mathbf{C}_{ind} \mathbf{x}_f(t) \end{cases}. \quad (5.50)$$

Aplicando-se a regra trapezoidal em (5.50):

$$\begin{cases} \mathbf{T}_{\text{ind}} \left[\frac{\mathbf{x}_f(t) - \mathbf{x}_f(t - \Delta t)}{\Delta t} \right] = \mathbf{A}_{\text{ind}} \left[\frac{\mathbf{x}_f(t) + \mathbf{x}_f(t - \Delta t)}{2} \right] + \mathbf{B}_{\text{ind}} \left[\frac{\tilde{\mathbf{u}}(t) + \tilde{\mathbf{u}}(t - \Delta t)}{2} \right], \\ \frac{\tilde{\mathbf{i}}_{\text{ind}}(t) + \tilde{\mathbf{i}}_{\text{ind}}(t - \Delta t)}{2} = \mathbf{C}_{\text{ind}} \left[\frac{\mathbf{x}_f(t) + \mathbf{x}_f(t - \Delta t)}{2} \right] \end{cases}, \quad (5.51)$$

Isolando-se $\mathbf{x}_f(t)$ na primeira equação de (5.51) e substituindo na segunda equação:

$$\mathbf{x}_f(t) = \left[\frac{2}{\Delta t} \mathbf{T}_{\text{ind}} - \mathbf{A}_{\text{ind}} \right]^{-1} \left[\left(\frac{2}{\Delta t} \mathbf{T}_{\text{ind}} + \mathbf{A}_{\text{ind}} \right) \mathbf{x}_f(t - \Delta t) + \mathbf{B}_{\text{ind}} \tilde{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{B}_{\text{ind}} \tilde{\mathbf{u}}(t - \Delta t) \right], \quad (5.52)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{i}}_{\text{ind}}(t) = \mathbf{C}_{\text{ind}} \left[\frac{2\mathbf{T}_{\text{ind}}}{\Delta t} - \mathbf{A}_{\text{ind}} \right]^{-1} \left[\left(\frac{2\mathbf{T}_{\text{ind}}}{\Delta t} + \mathbf{A}_{\text{ind}} \right) \mathbf{x}_f(t - \Delta t) + \mathbf{B}_{\text{ind}} \tilde{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{B}_{\text{ind}} \tilde{\mathbf{u}}(t - \Delta t) \right] \\ + \mathbf{C}_{\text{ind}} \mathbf{x}_f(t - \Delta t) - \tilde{\mathbf{i}}_{\text{ind}}(t - \Delta t). \end{aligned} \quad (5.53)$$

Fazendo-se a derivada da corrente $\tilde{\mathbf{i}}_{\text{ind}}(t)$ em relação à tensão $\tilde{\mathbf{u}}(t)$ tem-se a matriz de sensibilidades:

$$\frac{d\tilde{\mathbf{i}}_{\text{ind}}(t)}{d\tilde{\mathbf{u}}(t)} = \mathbf{S}_{\text{ind}} = \mathbf{C}_{\text{ind}} \left[\frac{2\mathbf{T}_{\text{ind}}}{\Delta t} - \mathbf{A}_{\text{ind}} \right]^{-1} \mathbf{B}_{\text{ind}}, \quad (5.54)$$

onde \mathbf{S}_{ind} é a matriz de sensibilidades. Substituindo-se (5.45) e (5.49) em (5.54):

$$\mathbf{S}_{\text{ind}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left(\frac{2}{\Delta t} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ L_{\text{ind}}^{-1} & 0 & 0 & \omega \\ 0 & L_{\text{ind}}^{-1} & -\omega & 0 \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ L_{\text{ind}}^{-1} & 0 \\ 0 & L_{\text{ind}}^{-1} \end{bmatrix}, \quad (5.55)$$

$$\mathbf{S}_{\text{ind}} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} = \frac{\Delta t}{L_{\text{ind}} (\omega^2 \Delta t^2 + 4)} \begin{bmatrix} 2 & \omega \Delta t \\ -\omega \Delta t & 2 \end{bmatrix}. \quad (5.56)$$

No passo 11, a matriz (5.56) é incluída na matriz de condutâncias \mathbf{S}_{ind} de barra \mathbf{G}_{bus} , criando-se a matriz condutâncias de barra modificada:

$$\mathbf{G}_{\text{busmod}} = \mathbf{G}_{\text{bus}} + \mathbf{S}_{\text{ind}}, \quad (5.57)$$

onde \mathbf{S}'_{ind} é uma matriz com as mesmas dimensões de \mathbf{G}_{bus} ($2n_b \times 2n_b$, onde n_b é o número de barras do sistema) e com elementos nulos, exceto nas quatro posições que contêm como submatriz, as quais são relativas à barra onde o indutor fixo está conectado ao sistema:

$$\mathbf{S}'_{\text{ind}} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & & & & \vdots \\ 0 & \dots & s_{11} & s_{12} & \dots & 0 \\ 0 & \dots & s_{21} & s_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}_{2n_b \times 2n_b} \quad (5.58)$$

No passo 12 o vetor de correntes de acompanhamento $\tilde{\mathbf{i}}_{\text{Nind}}$ é montado e no passo 13 as posições das fontes de tensão são eliminadas deste vetor, de modo que fique com a mesma dimensão do vetor $\tilde{\mathbf{i}}_d$ dado em (4.8).

$$\begin{bmatrix} I_{\text{Nind Re}}(t) \\ I_{\text{Nind Im}}(t) \end{bmatrix} = \tilde{\mathbf{i}}_{\text{ind}} - \mathbf{S}_{\text{ind}} \tilde{\mathbf{u}}, \quad (5.59)$$

$$\begin{bmatrix} I_{\text{Nind Re}}(t) \\ I_{\text{Nind Im}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{\text{ind Re}}(t) \\ I_{\text{ind Im}}(t) \end{bmatrix} - \frac{\Delta t}{L_{\text{ind}} (\omega^2 \Delta t^2 + 4)} \begin{bmatrix} 2 & \omega \Delta t \\ -\omega \Delta t & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\text{ind Re}}(t) \\ V_{\text{ind Im}}(t) \end{bmatrix}, \quad (5.60)$$

$$\tilde{\mathbf{i}}_{\text{Nind}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ I_{\text{Nind Re}}(t) \\ I_{\text{Nind Im}}(t) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{2n_b \times 1} \quad (5.61)$$

No passo 14 o seguinte sistema linear, baseado em (4.9), é resolvido para obter-se as tensões desconhecidas:

$$\tilde{\mathbf{v}}_d = [\mathbf{G}_{\text{busmod_dd}}]^{-1} \left[\left(\tilde{\mathbf{i}}_d - \tilde{\mathbf{i}}_{\text{Nind}} \right) - \mathbf{G}_{\text{busmod_dc}} \tilde{\mathbf{v}}_c \right]. \quad (5.62)$$

Implementando-se o Algoritmo 5.6 no MATLAB e simulando-se o mesmo Sistema Teste 3a (Figura 5.12) tem-se os resultados das comparações entre DPTS e PSCAD mostrados a seguir. O passo de integração utilizado nestas simulações foi de $50 \mu\text{s}$ em ambos os programas. A fonte de tensão constante possui frequência de 60 Hz e tensão RMS igual a 500 kV. O valor do indutor fixo foi alterado para 5 H. O evento simulado foi a energização do sistema (conexão da fonte) em $t=0$.

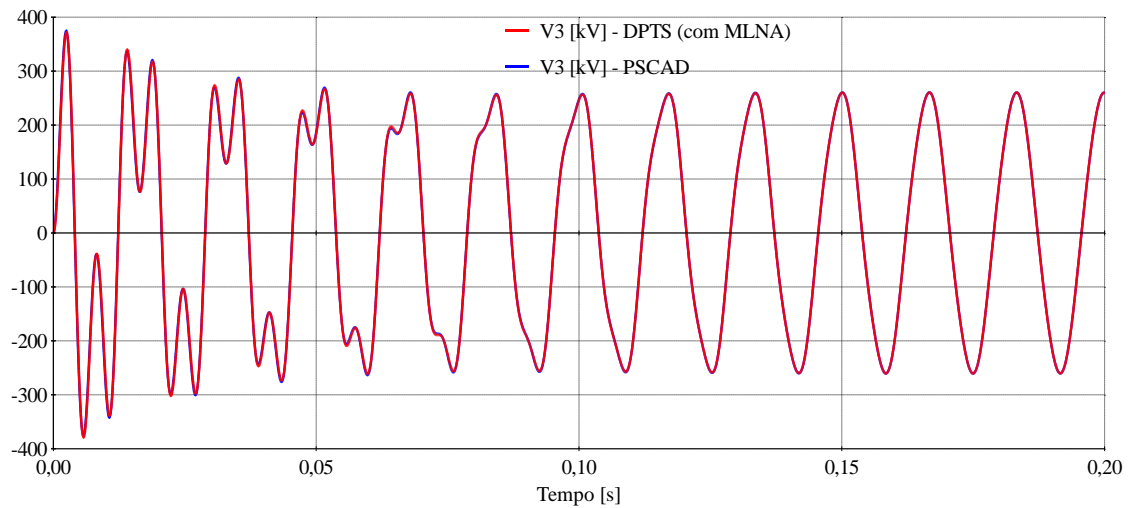


Figura 5.20 – Comparação DPTS e PSCAD da tensão na barra 3.

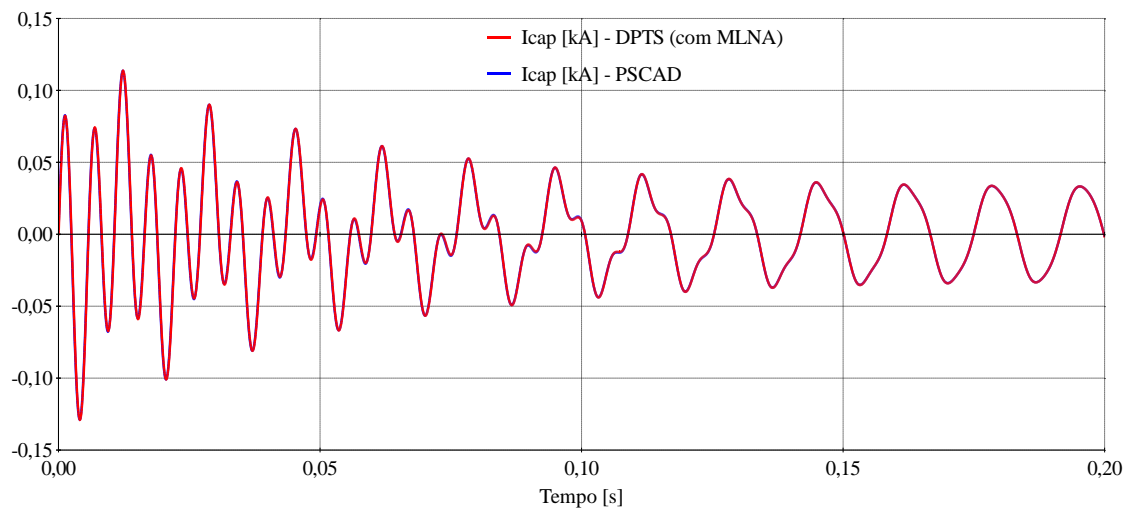


Figura 5.21 – Comparação DPTS e PSCAD da corrente no capacitor.

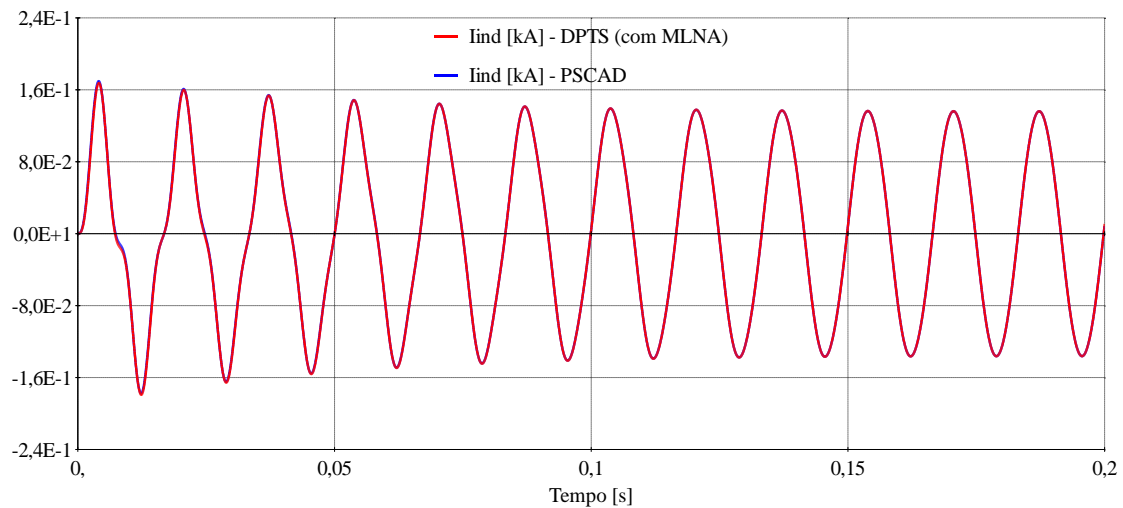


Figura 5.22 – Comparação DPTS e PSCAD da corrente no indutor fixo inserido.

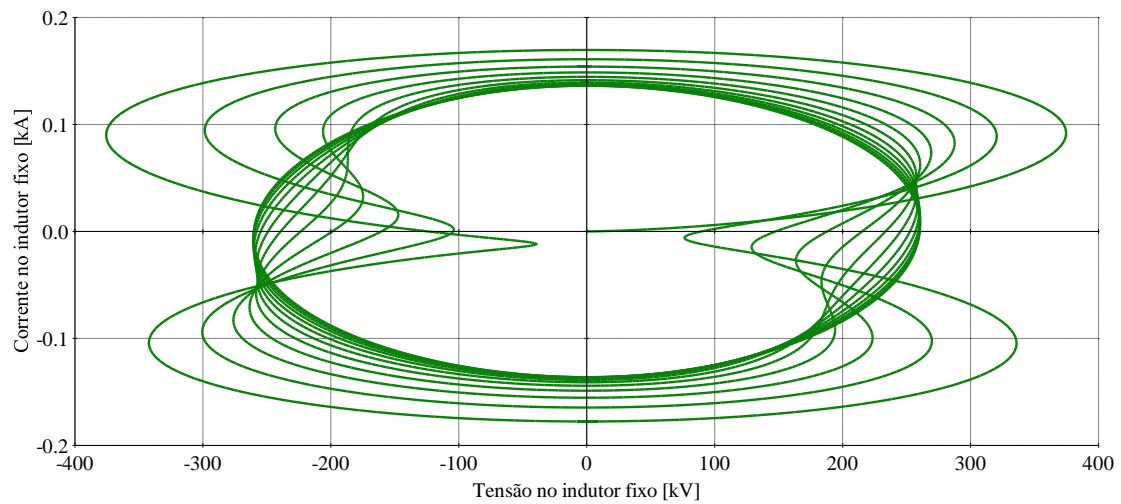


Figura 5.23 – Característica dinâmica I-V da resposta do indutor fixo.

Observando-se dos resultados das simulações (Figura 5.20 a Figura 5.22), verifica-se que as curvas do DPTS e do PSCAD são praticamente coincidentes, o que comprova que o método de solução alternada incluindo o MLA está adequadamente implementado. Outro ponto importante a ser destacado é que neste caso o MLA converge com apenas uma iteração, já que o indutor fixo é um elemento linear. A Figura 5.23 mostra a curva de Lissajous [CUNDY 1989] ou característica I-V [RASHID 2001] da resposta do indutor fixo, onde a curva tende, em regime permanente, para uma elipse horizontal (frequências iguais e defasagem de 90 graus), como é esperado para um indutor. Durante o período transitório, a curva parte com uma característica aproximada de duas elipses devido ao modo dominante para esta resposta.

5.5 DPTS incluindo SVC com solução pelo método alternado

Nesta seção apresenta-se o detalhamento da implementação no Código MATLAB do DPTS das rotinas de solução do TCR (conforme metodologia indicada no Apêndice A). Inicialmente é apresentado o método alternado (rede-TCR) sem o Modelo Linearizado de Acompanhamento e os resultados de validação com o PSCAD. Em seguida o MLA é incluído com o objetivo de agilizar a convergência do método numérico. Salienta-se que o modelo de fasores dinâmicos do SVC considerado é o de frequência fundamental, onde os harmônicos são desprezados, mas que apresenta resultados praticamente coincidentes com aqueles do PSCAD os quais, para fins de estudos de performance dinâmica, podem ser considerados suficientes.

5.5.1 Método alternado sem MLA

O Algoritmo 5.7 descreve a estrutura principal do programa que foi implementado no MATLAB, objetivando-se demonstrar o método de solução alternado do simulador DPTS que pode simular uma rede elétrica genérica contendo um SVC conectado em uma de suas barras. É importante salientar que o Algoritmo 5.7 ainda não contempla o Modelo Linearizado de Acompanhamento (sensibilidades) na solução alternada.

Algoritmo 5.7 – DPTS com SVC (método alternado sem MLA).

01	Início;
02	Leitura de dados;
03	Inicialização do SVC;
04	Inicialização da rede;
05	Montagem da matriz \mathbf{G}_{bus} ;
06	Para t de 0 a T_{max} faça:
07	Extrapolação quadrática;
08	Atualização do vetor das funções não-lineares do TCR ($\mathbf{f}(\mathbf{x}_i) = \mathbf{f}(\mathbf{x}_f)$);
09	Enquanto <i>erro</i> > tolerância faça:
10	Execução da rotina CALCNEWT (calcula \mathbf{x}_f);
11	Verificação da convergência do Método de Newton;
12	Atualização das tensões conhecidas $\tilde{\mathbf{v}}_c$ das fontes (geradores);
13	Montagem do vetor $\tilde{\mathbf{i}}_{tcr}$ de correntes do TCR;
14	Eliminação das posições das fontes de tensão no vetor $\tilde{\mathbf{i}}_{tcr}$;

- 15 Verificação da ocorrência de chaveamentos e modificação de \mathbf{G}_{bus} ;
- 16 Solução do sist. linear (incluindo $\tilde{\mathbf{i}}_{cr}$) obtendo tensões desconhecidas ($\tilde{\mathbf{v}}_d$);
- 17 Atualização das tensões das barras;
- 18 Atualização do *erro*;
- 19 Atualização da tensão $\tilde{\mathbf{u}}$ do SVC;
- 20 Fim.
- 21 Cálculo dos vetores de correntes ($\tilde{\mathbf{i}}_{km}$, $\tilde{\mathbf{i}}_{knh}$ e $\tilde{\mathbf{i}}_d$);
- 22 Atualização dos vetores de variáveis de plotagem utilizando \mathbf{x}_f ;
- 23 Fim.
- 24 Plotagem das curvas no tempo;
- 25 Fim.

No Algoritmo 5.7, o passo 02 consiste na leitura do arquivo em formato texto (conforme formato da Tabela B.1) contendo os parâmetros dos equipamentos e controles associados e os dados de simulação. Tais informações são armazenadas em variáveis (escalares, vetores e matrizes) de modo a serem utilizadas nas rotinas e cálculos posteriores. O passo 03 consiste nas rotinas de inicialização do SVC, onde o vetor \mathbf{x}_f de variáveis do TCR é calculado para a condição inicial de regime permanente. Neste passo também é calculada a susceptância do TCR e definido o vetor $\tilde{\mathbf{u}}$ da tensão terminal do TCR. No passo 04 a rede é inicializada através do cálculo das correntes injetadas nas barras e corrente dos elementos R, L, C e LT, utilizando-se para isto as equações (3.11), (3.28), (3.44) e (3.62)-(3.69).

O passo 05 consiste na montagem da matriz de condutâncias de barras \mathbf{G}_{bus} conforme (4.3). No passo 06 inicia-se o laço de tempo, onde o tempo simulado varia de 0 até o valor T_{max} . No passo 07 é realizada uma extrapolação quadrática do vetor \mathbf{x}_f de variáveis do TCR de modo a acelerar a convergência do algoritmo. O passo 08 é a atualização do vetor das funções não-lineares do método de solução de Newton-Raphson presente na rotina CALCNEWT, a qual é explicada em detalhes mais adiante. No passo 09 inicia-se o laço de solução alternada da rede e SVC (sem utilizar ainda o MLA). No passo 10 a rotina CALCNEWT é executada, onde o vetor \mathbf{x}_f de variáveis do TCR (que inclui as injeções de corrente do TCR na rede) é calculado pelo método de Newton-Raphson utilizando-se as equações (A.1)-(A.19). No passo 11 verifica-se a convergência (se erro é menor que a tolerância) do método de Newton Raphson presente na rotina CALCNEWT.

No passo 12 os fasores dinâmicos das tensões das fontes $\tilde{\mathbf{v}}_c$ (geradores) são calculados utilizando-se (4.15). Nos passos 13 e 14 são realizadas respectivamente a montagem do vetor $\tilde{\mathbf{i}}_{\text{tcr}}$ de correntes do TCR e a eliminação das posições das fontes de tensão neste vetor. No passo 15 a matriz \mathbf{G}_{bus} é adequadamente modificada caso verifique-se a ocorrência de algum chaveamento naquele instante da simulação no tempo, conforme explicado no Algoritmo 4.1. No passo 16 o sistema linear (4.9) é solucionado para a obtenção das tensões desconhecidas $\tilde{\mathbf{v}}_d$, incluindo-se nesta solução as injeções de corrente do TCR. Nos passos 17 a 19 são respectivamente atualizadas as tensões das barras (vetores $\tilde{\mathbf{v}}_c$ e $\tilde{\mathbf{v}}_d$), o erro relativo ao laço de solução alternada (passo 09) e o vetor $\tilde{\mathbf{u}}$ da tensão terminal do TCR. Findado o laço de solução alternada rede-SVC e de posse dos valores previamente calculados das tensões nas barras, as correntes injetadas nas barras da rede e as correntes nos elementos da rede são calculadas conforme as equações (3.11), (3.28), (3.44) e (3.62)-(3.69).

No passo 22, as tensões do instante de tempo anterior e diversas outras variáveis são atualizadas para posterior plotagem dos resultados da simulação. Findado o laço principal de tempo (passo 06), as curvas no tempo são plotadas exibindo-se assim os resultados da simulação.

Algoritmo 5.8 – Rotina CALCNEWT do DPTS.

01	Início:
02	Enquanto {erro > tolerância} e {não atingir máximo de iterações} faça:
03	Atualização da matriz Jacobiana \mathbf{A} ;
04	Calcula o vetor da função não-linear $\mathbf{f}(\mathbf{x}_f)$;
05	Calcula a equação para σ por integral da tensão e inclui resultado em \mathbf{A} e $\mathbf{f}\mathbf{x}$;
06	Solução de sistema linear para cálculo do vetor de desvios ($\Delta\mathbf{x}_f$);
07	Atualização das variáveis ($\mathbf{x}_f = \mathbf{x}_f + \Delta\mathbf{x}_f$);
08	Imposição de limite (máximo ou mínimo) para a susceptância do TCR;
09	Cálculo do erro para os ângulos principais ($\Delta\alpha$, $\Delta\theta_{PLL}$ e $\Delta\sigma$);
10	Fim.
11	Fim.

As equações do SVC e do seu respectivo sistema de controle formam um sistema não-linear de equações diferenciais e algébricas:

$$\mathbf{T}\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{B}\tilde{\mathbf{u}}, \quad (5.63)$$

onde \mathbf{x} é o vetor de variáveis e $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ é um vetor função de \mathbf{x} . Aplicando-se a regra trapezoidal em (5.63):

$$\frac{\mathbf{T}(\mathbf{x}_f - \mathbf{x}_i)}{\Delta t} = \frac{\mathbf{f}(\mathbf{x}_f) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_i)}{2} + \mathbf{B} \frac{\tilde{\mathbf{u}}_f + \tilde{\mathbf{u}}_i}{2}, \quad (5.64)$$

onde os subscritos f e i indicam, respectivamente, valores no final e no início do intervalo. Observa-se que (5.64) é não-linear e \mathbf{x}_f é a variável desconhecida. Logo, pode-se utilizar o método de Newton-Raphson para solucionar a equação da seguinte forma:

$$\mathbf{x}_f^{(i+1)} = \mathbf{x}_f^{(i)} + \Delta \mathbf{x}_f^{(i+1)}, \quad (5.65)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_f^{(i+1)}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}_f^{(i)}) + [\mathbf{A}(\mathbf{x}_f^{(i)})] \Delta \mathbf{x}_f^{(i+1)}, \quad (5.66)$$

onde i é o índice relativo às iterações do método de Newton-Raphson e \mathbf{A} é a matriz Jacobiana, cujos elementos são dados por:

$$a_{lin,col} = \frac{\partial f_{lin}(\mathbf{x}_f^{(i)})}{\partial x_{col}}, \quad (5.67)$$

onde lin e col são índices relativos às linhas e colunas da matriz Jacobiana. Substituindo-se (5.65) e (5.66) em (5.64):

$$\frac{\mathbf{T}(\mathbf{x}_f^{(i)} + \Delta \mathbf{x}_f^{(i+1)} - \mathbf{x}_i)}{\Delta t} = \frac{\mathbf{f}(\mathbf{x}_f^{(i)}) + [\mathbf{A}(\mathbf{x}_f^{(i)})] \Delta \mathbf{x}_f^{(i+1)} + \mathbf{f}(\mathbf{x}_i)}{2} + \mathbf{B} \frac{\tilde{\mathbf{u}}_f + \tilde{\mathbf{u}}_i}{2}, \quad (5.68)$$

$$\Delta \mathbf{x}_f^{(i+1)} = \left(\frac{2\mathbf{T}}{\Delta t} - \mathbf{A}(\mathbf{x}_f^{(i)}) \right)^{-1} \left[\frac{2\mathbf{T}}{\Delta t} (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_f^{(i)}) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_f^{(i)}) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_i) + \mathbf{B}\tilde{\mathbf{u}}_f + \mathbf{B}\tilde{\mathbf{u}}_i \right], \quad (5.69)$$

No Algoritmo 5.8 é explicada a rotina CALCNEWT onde o vetor \mathbf{x}_f de variáveis do TCR (que inclui as injeções de corrente do TCR na rede) é calculado pelo método de Newton-Raphson.

No passo 02 inicia-se o laço iterativo do método de Newton-Raphson, o qual se encerrará apenas quando o erro for menor que uma determinada tolerância ou quando o número máximo de iterações admitidas para este processo for atingido. No passo 03 a matriz Jacobiana \mathbf{A} é atualizada utilizando-se as equações de derivadas parciais que são deduzidas a partir das equações (A.1)-(A.19), conforme [GOMES 2006].

No passo 04 o vetor $\mathbf{f}(\mathbf{x}_f)$ é calculado e no passo 05 o ângulo de condução σ é calculado pela equação (A.25) e os resultados obtidos são incluídos em \mathbf{A} e $\mathbf{f}(\mathbf{x}_f)$.

No passo 06, o sistema linear (5.69) é resolvido para obter-se o vetor de desvios $\Delta\mathbf{x}_f$ da iteração atual e no passo 07 este mesmo vetor é utilizado para atualização do valor das variáveis da próxima iteração. No passo 08 o limite (máximo ou mínimo) é imposto à susceptância do TCR, caso o valor da mesma ultrapasse tais limites. No passo 09 o *erro* é calculado da seguinte forma:

$$erro = \text{MAX}\{\Delta\alpha, \Delta\theta_{PLL}, \Delta\sigma\}, \quad (5.70)$$

onde $\Delta\alpha$, $\Delta\theta_{PLL}$ e $\Delta\sigma$ são, respectivamente, as variações dos ângulos de disparo, referência e condução do TCR. Não é necessário a tolerância de convergência para todas as variáveis, mas apenas o teste de tolerância destas 3 variáveis (contidas no vetor $\Delta\mathbf{x}_f$) já é suficiente para verificar-se a convergência do processo. Antes do cálculo das variáveis para o próximo intervalo, um esquema de extrapolação de variáveis pode ser utilizado para tornar a convergência mais rápida. Com relação a esta extrapolação de variáveis (passo 07 do Algoritmo 5.7) são feitas as seguintes explicações.

Seja uma função do tempo quadrática $y(t)$. Assumindo-se que t_f é o último valor conhecido de $y(t)$ e que os dois pontos anteriores (igualmente espaçados) também são conhecidos, é possível fazer uma extrapolação quadrática da seguinte forma:

$$y(t) = a(t - t_f)^2 + b(t - t_f) + c. \quad (5.71)$$

Substituindo-se os valores conhecidos na função:

$$y(t_f) = y_3 = a(t_f - t_f)^2 + b(t_f - t_f) + c \quad \therefore y_3 = c, \quad (5.72)$$

$$y(t_f - \Delta t) = y_2 = a(t_f - \Delta t - t_f)^2 + b(t_f - \Delta t - t_f) + c \quad \therefore \quad y_2 = a\Delta t^2 - b\Delta t + c, \quad (5.73)$$

$$y(t_f - 2\Delta t) = y_1 = 4a\Delta t^2 - 2b\Delta t + c. \quad (5.74)$$

A partir de (5.72), (5.73) e (5.74) determina-se os três parâmetros da parábola:

$$a\Delta t^2 = y_2 + b\Delta t - y_3, \quad (5.75)$$

$$4(y_2 + b\Delta t - y_3) - 2b\Delta t + y_3 = y_1 \quad \Rightarrow \quad b = \frac{y_1 - 4y_2 + 3y_3}{2\Delta t}. \quad (5.76)$$

Substituindo-se o valor de b em (5.75),

$$a\Delta t^2 = y_2 + \frac{y_1 - 4y_2 + 3y_3}{2\Delta t} \Delta t - y_3, \quad (5.77)$$

logo,

$$a = \frac{y_1 - 2y_2 + y_3}{2\Delta t^2}; \quad b = \frac{y_1 - 4y_2 + 3y_3}{2\Delta t}; \quad c = y_3. \quad (5.78)$$

Portanto, a extrapolação para $t_f + \Delta t$ é:

$$y(t_f + \Delta t) = \frac{y_1 - 2y_2 + y_3}{2} + \frac{y_1 - 4y_2 + 3y_3}{2} + y_3 = y_1 - 3y_2 + 3y_3, \quad (5.79)$$

e a extrapolação para $t_f + \Delta t/2$ é:

$$y\left(t_f + \frac{\Delta t}{2}\right) = \frac{y_1 - 2y_2 + y_3}{8} + \frac{y_1 - 4y_2 + 3y_3}{4} + y_3 = \frac{3y_1 - 10y_2 + 15y_3}{8}, \quad (5.80)$$

Este esquema de extrapolação de variáveis pode ser desabilitado em um determinado intervalo da simulação onde um distúrbio seja aplicado na rede elétrica, de modo a evitar que as estimativas oriundas da extrapolação sejam inadequadas e acabem provocando a piora da convergência.

Implementou-se o Algoritmo 5.7 no MATLAB e simulou-se o Sistema Teste 3b cujo diagrama é mostrado na Figura 5.24 e o arquivo de dados é apresentado na Tabela B.7 do Apêndice B.

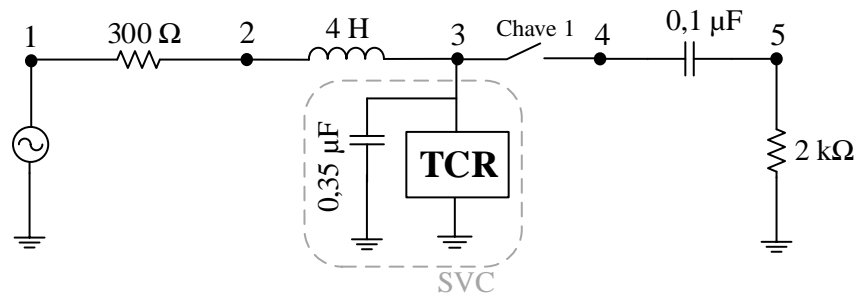


Figura 5.24 – Sistema Teste 3b no DPTS (MATLAB).

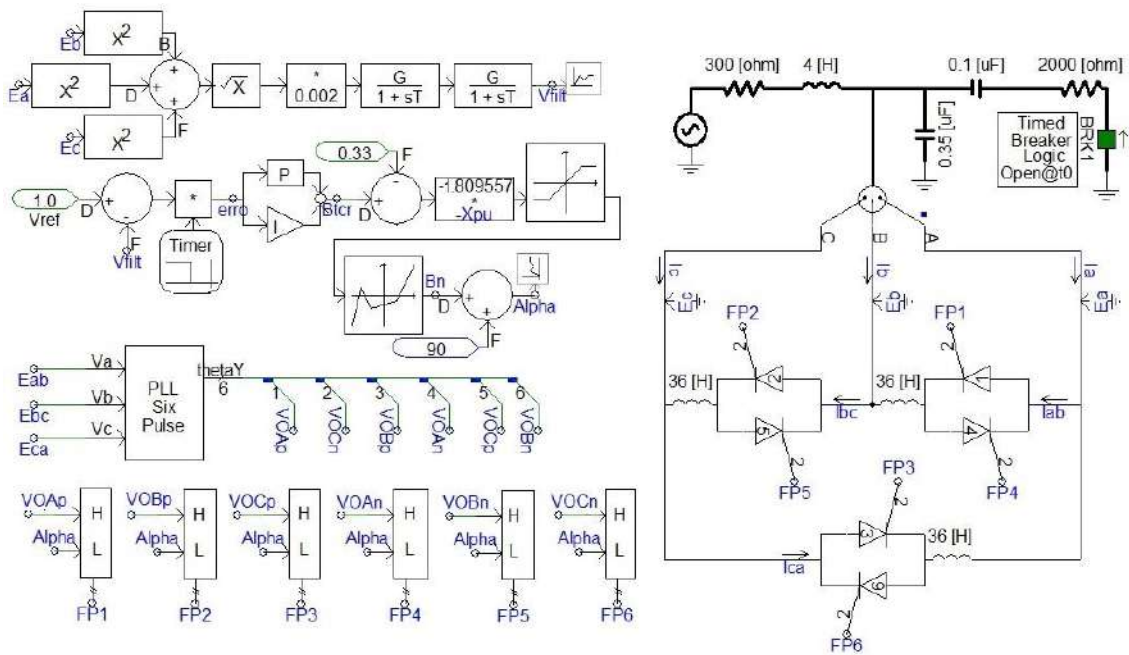


Figura 5.25 – Sistema Teste 3b no PSCAD.

A Figura 5.25 mostra o Sistema Teste 3b implementado no programa PSCAD com o objetivo de validar as implementações realizadas no MATLAB.

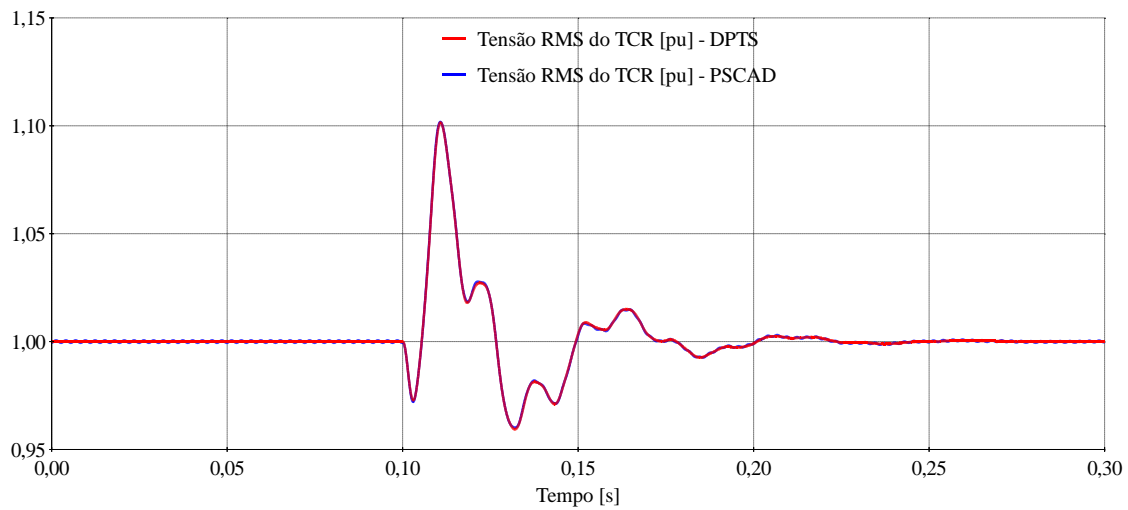


Figura 5.26 – Comparação da tensão RMS (filtrada) do TCR.

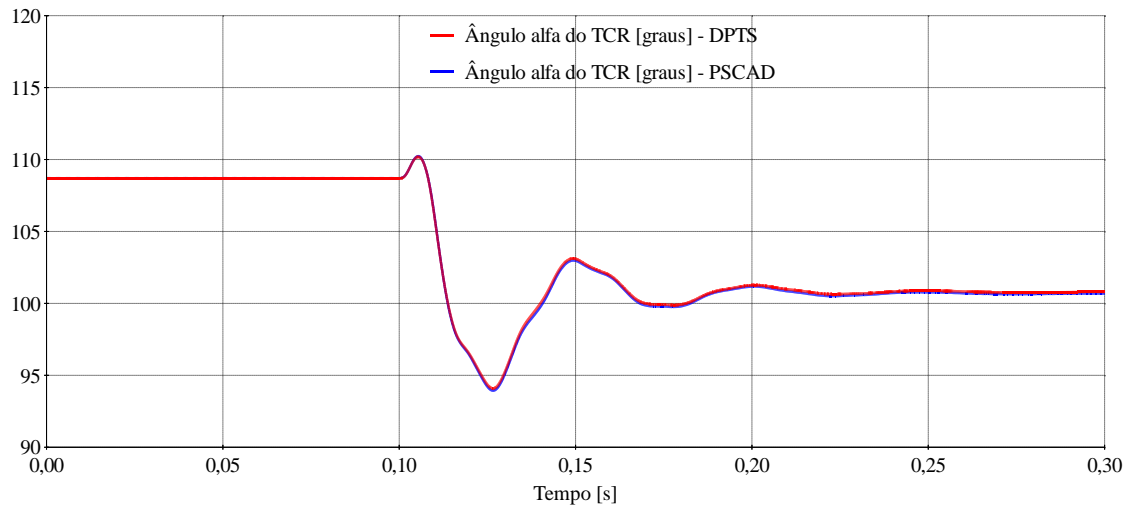


Figura 5.27 – Comparação do ângulo de disparo do TCR.

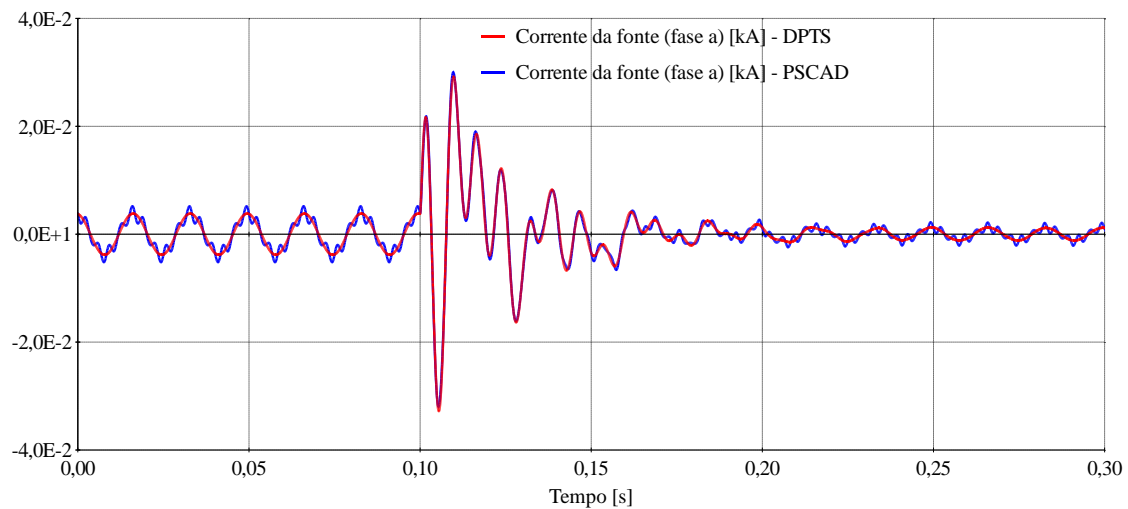


Figura 5.28 – Comparação da corrente instantânea na fase “a” da fonte.

Da Figura 5.26 a Figura 5.28 são apresentadas as comparações das simulações no MATLAB e no PSCAD, onde simulou-se o fechamento da “Chave 1” em $t = 0,1$ s. Verifica-se que os resultados foram satisfatórios. A curva da corrente instantânea da fonte na fase “a” simulada no PSCAD revela uma componente de sexto harmônico que é característica do TCR. Já a mesma curva no MATLAB não apresenta tal componente harmônica devido ao fato do modelo do TCR implementado no DPTS ser de frequência fundamental.

5.5.2 Método alternado com MLA

O Algoritmo 5.9 descreve a estrutura principal do programa que foi implementado no MATLAB, objetivando-se demonstrar o método de solução alternado do simulador DPTS incluindo o Modelo Linearizado de Acompanhamento para o SVC, onde estão destacados em vermelho os passos que sofreram alteração em relação ao método sem MLA implementado anteriormente.

Algoritmo 5.9 – DPTS com SVC (método alternado com MLA).

```

01 Início:
02   Leitura de dados;
03   Inicialização do SVC;
04   Inicialização da rede;
05   Montagem da matriz  $\mathbf{G}_{bus}$ ;
06   Para  $t$  de 0 a  $T_{max}$  faça:
07     Extrapolação quadrática;
08     Verificação da ocorrência de chaveamentos e modificação de  $\mathbf{G}_{bus}$ ;
09     Atualização do vetor das funções não-lineares do TCR (  $\mathbf{f}(\mathbf{x}_i)=\mathbf{f}(\mathbf{x}_f)$  );
10     Enquanto erro > tolerância faça:
11       Execução da rotina CALCNEWT (calcula  $\mathbf{x}_f$ );
12       Verificação da convergência do Método de Newton;
13       Atualização das tensões conhecidas  $\tilde{\mathbf{v}}_c$  das fontes (geradores);
14       Cálculo da matriz de sensibilidades do MLA  $\mathbf{S}_{tcr}$  do TCR;
15       Montagem do vetor de correntes do MLA  $\tilde{\mathbf{i}}_{Ntcr}$  do TCR;
16       Eliminação das posições das fontes de tensão no vetor  $\tilde{\mathbf{i}}_{Ntcr}$  ;
17       Modificação de  $\mathbf{G}_{bus}$  para incluir matriz de sensibilidades do MLA;

```

18	Solução do sistema linear para obter $\tilde{\mathbf{v}}_d$ (considerando $\tilde{\mathbf{i}}_{\text{TCR}}$ e $\tilde{\mathbf{i}}_{\text{Ncr}}$);
19	Atualização das tensões das barras;
20	Atualização do <i>erro</i> ;
21	Atualização da tensão $\tilde{\mathbf{u}}$ do SVC;
22	Fim.
23	Cálculo dos vetores de correntes ($\tilde{\mathbf{i}}_{km}$, $\tilde{\mathbf{i}}_{kmh}$ e $\tilde{\mathbf{i}}_d$);
24	Atualização dos vetores de variáveis de plotagem utilizando \mathbf{x}_r ;
25	Fim.
26	Plotagem das curvas no tempo;
27	Fim.

No Algoritmo 5.9, os passos 14 a 18 contemplam o MLA no algoritmo de solução do DPTS implementado no MATLAB, onde o vetor de correntes do MLA é dado por (5.25) e a matriz de sensibilidades do MLA é dada por (5.26). A seguir são apresentados os resultados comparativos das simulações com o PSCAD, onde o Sistema teste 2c foi utilizado para a validação. O arquivo de dados do DPTS para este sistema é apresentado na Tabela B.5 e o diagrama na Figura B.4 do Apêndice B.

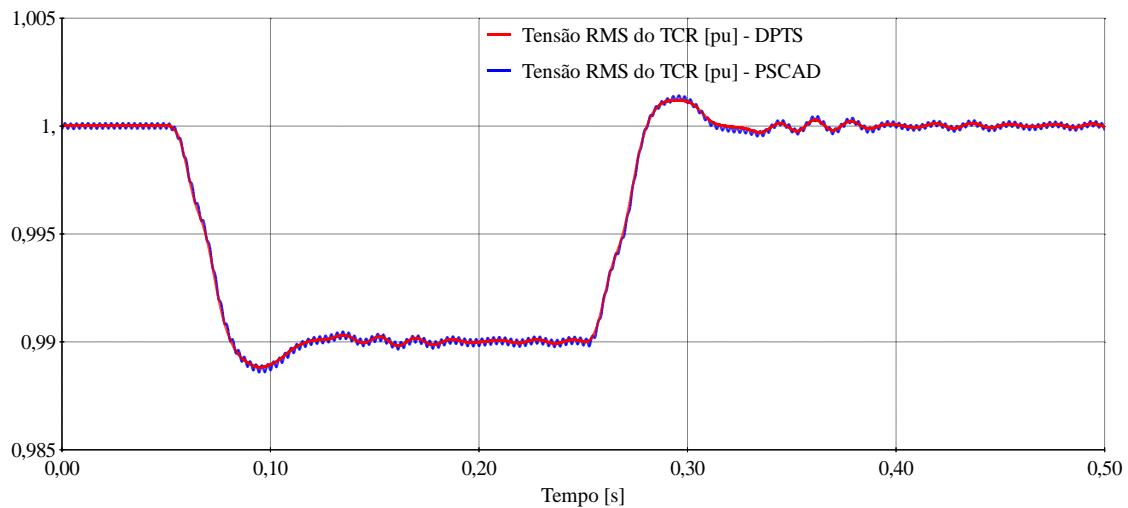


Figura 5.29 – Degrau -1% / +1% - Comparação da tensão RMS (filtrada) do TCR.

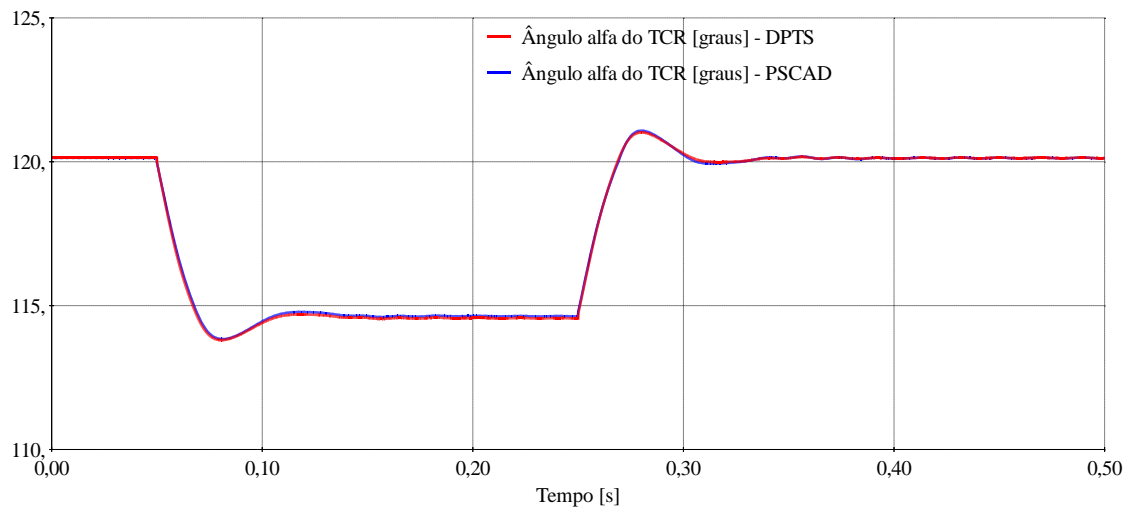


Figura 5.30 – Degrau -1% / +1% - Comparação do ângulo de disparo do TCR.

A Figura 5.29 e a Figura 5.30 apresentam os resultados da simulação de dois degraus de -1% e +1% respectivamente aplicados na tensão de referência V_{ref} do controle de tensão do TCR (Figura A.3 do Apêndice A), onde os ganhos do controlador proporcional-integral do mesmo foram alterados para $K_{P-PI} = 1$ e $K_{I-PI} = 2500$.

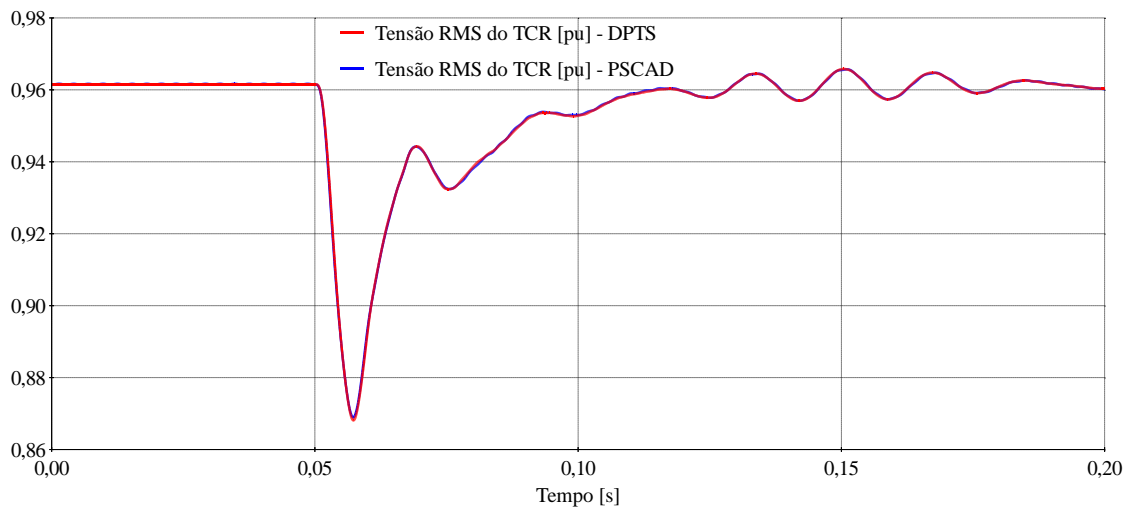


Figura 5.31 – Chaveamento - Comparação da tensão RMS (filtrada) do TCR.

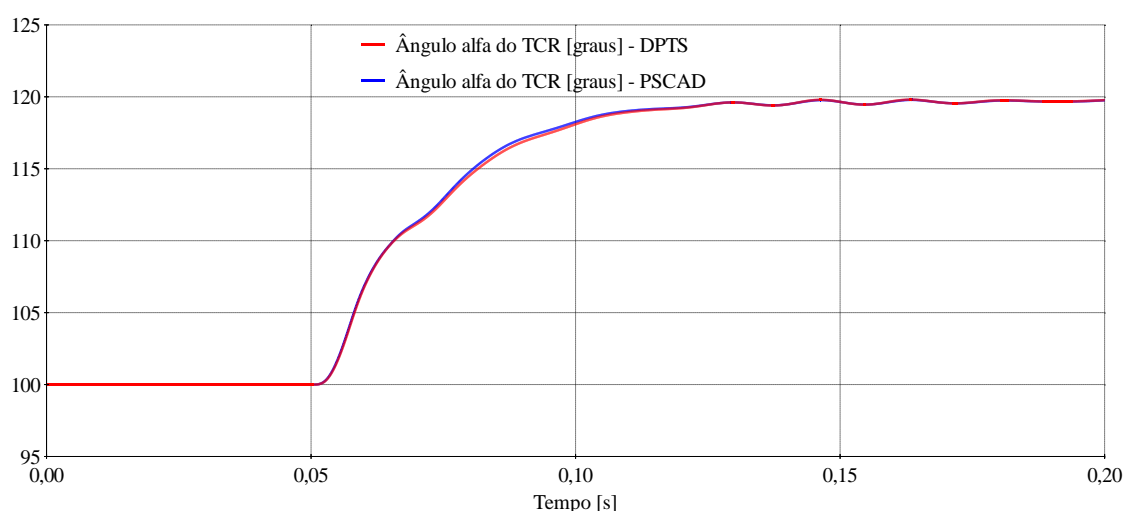


Figura 5.32 – Chaveamento - Comparação do ângulo de disparo do TCR.

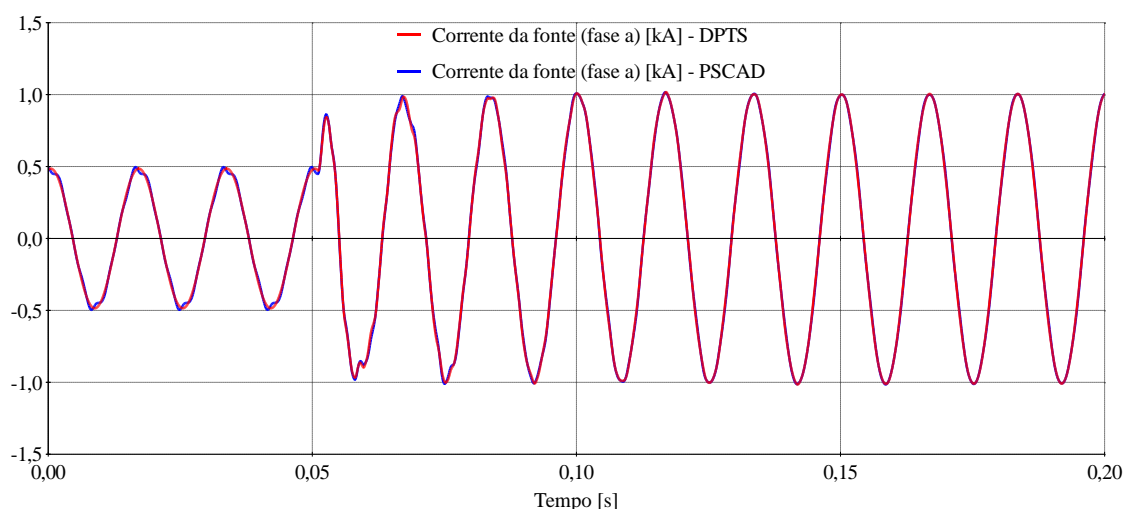


Figura 5.33 – Chaveamento - Comparação da corrente instantânea na fase “a” da fonte.

Da Figura 5.31 até a Figura 5.33 são apresentados os resultados da simulação do chaveamento de uma carga através do fechamento da Chave 10-12. Nesta simulação, os ganhos considerados para o controlador PI do controle de tensão do TCR foram $K_{P-PI} = 0,05$ e $K_{I-PI} = 1000$.

A solução alternada do DPTS apresentada nesta seção proporciona uma solução modular de equipamentos, sistema de controle e rede elétrica. Esta proposta é eficiente e tem requisitos menores do que a escolha natural da solução simultânea, onde todas as variáveis são resolvidas por meio de uma matriz Jacobiana de dimensões bastante elevadas. A característica alternada de solução também facilitaria uma eventual utilização

de processamento paralelo [TANENBAUM 2002], [ZHOU 2014], uma vez que permitiria a distribuição dos cálculos das equações dos equipamentos não-lineares para vários núcleos de processamento. Além destas vantagens, o método proposto mantém as propriedades numéricas de convergência, precisão e robustez da solução simultânea em sua forma original, e pode ser ainda mais otimizado em eficiência quando se utiliza a simplificação *Quasi-Newton*, conforme é explicado mais adiante quando a metodologia de inclusão de harmônicos for apresentada.

5.6 DPTS incluindo múltiplos SVCs

Uma vez implementado o DPTS que simula a rede contendo um único TCR, o algoritmo foi generalizado para que o DPTS possa simular uma rede contendo múltiplos TCRs, cada qual com seus parâmetros, sistemas de controle e PLLs independentes. Nesta seção são apresentados os resultados das simulações de redes contando mais de um SVC.

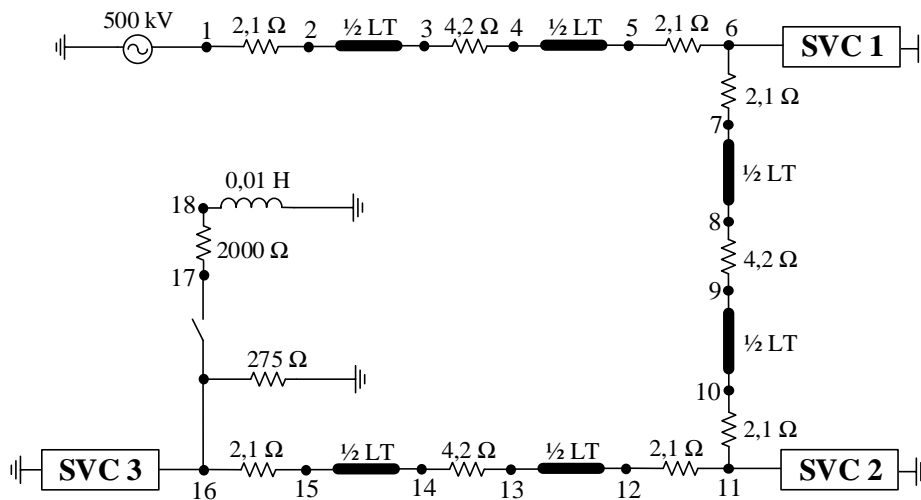


Figura 5.34 – Sistema Teste 5a no MATLAB.

O Sistema Teste 5a foi utilizado para a realização da simulação do DPTS incluindo múltiplos SVCs, conforme mostrado na Figura 5.34. Os TCRs que compõem os SVCs são considerados como conectados em delta. Maiores detalhes sobre este sistema são apresentados no Apêndice B.

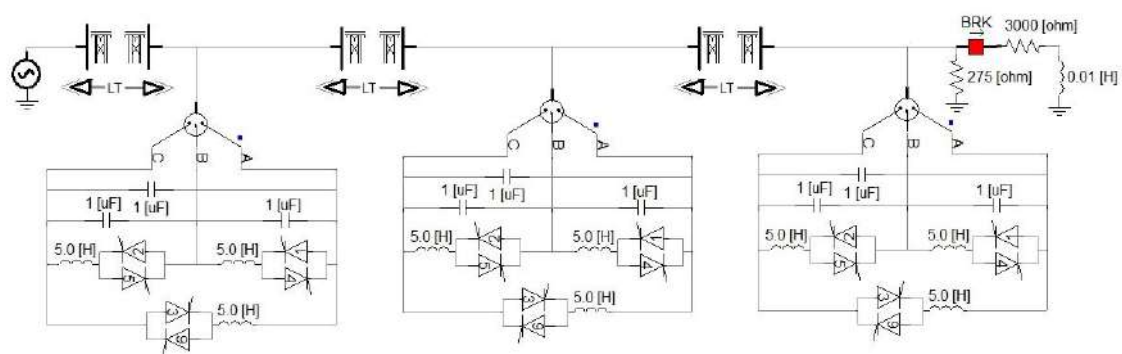


Figura 5.35 – Sistema Teste 5a no PSCAD.

Este mesmo sistema foi representado no PSCAD, conforme mostrado na Figura 5.35.

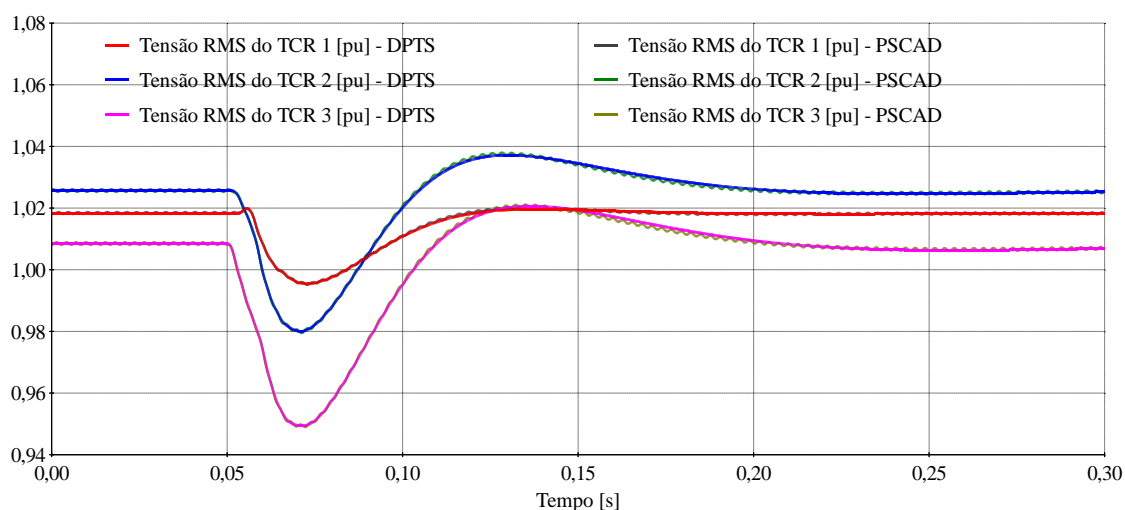


Figura 5.36 – Tensão RMS dos TCRs 1, 2 e 3.

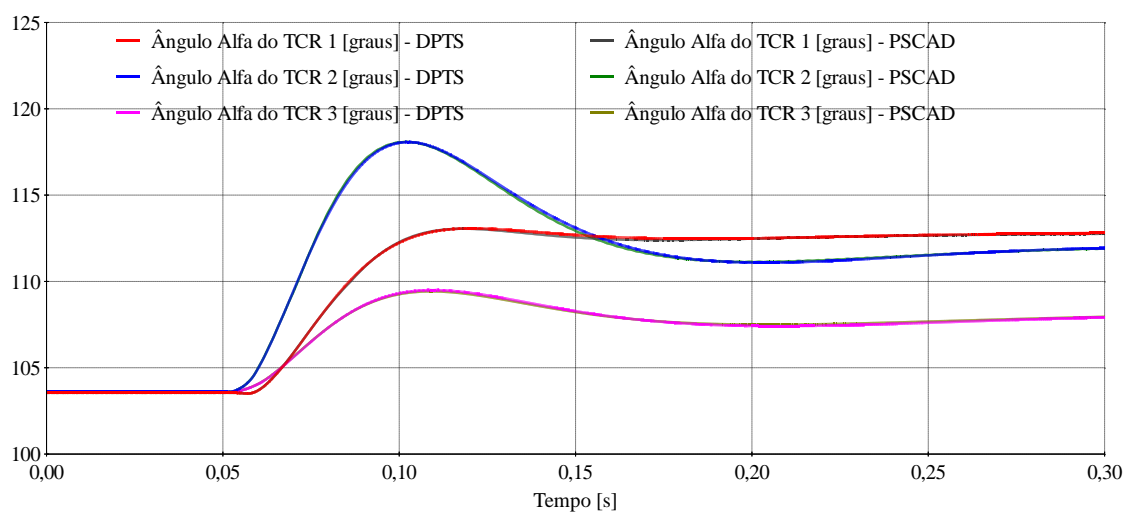


Figura 5.37 – Ângulos de disparo dos TCRs 1, 2 e 3.

A Figura 5.36 e a Figura 5.37 apresentam os resultados da validação com o PSCAD, onde é aplicado o evento de fechamento da chave 16-17 em $t=50$ ms e observa-se que as curvas em ambos simuladores são praticamente coincidentes. A seguir, o Sistema Teste 4a é utilizado para a realização outras simulações envolvendo a presença de mais de um SVC, agora para uma rede de maior porte contendo 20 barras e várias LTs de parâmetros distribuídos representadas por Bergeron.

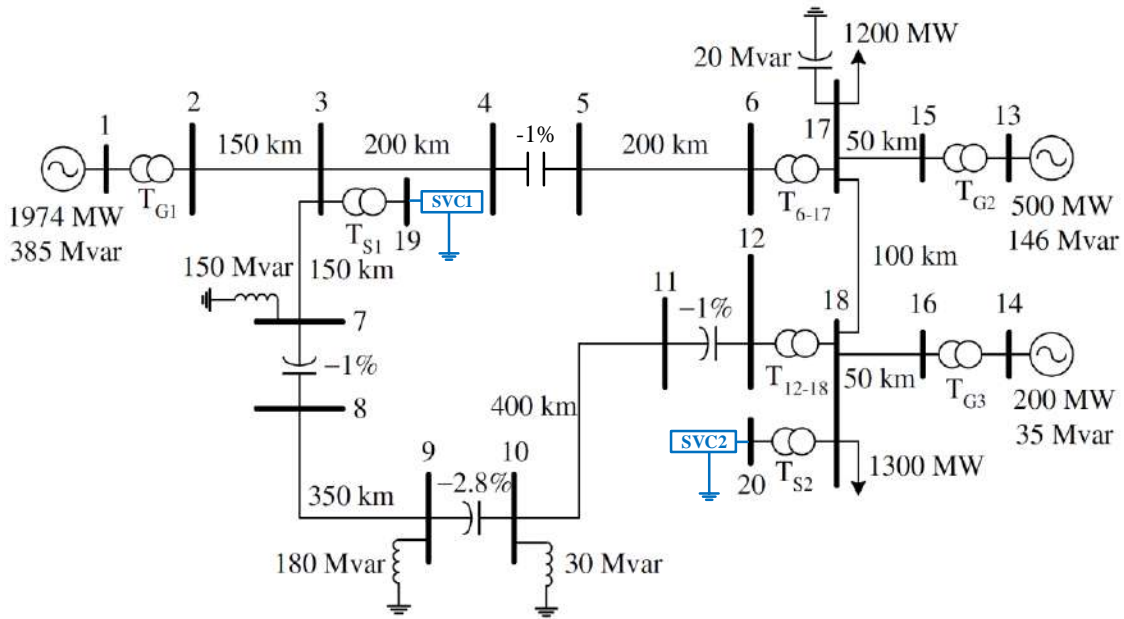


Figura 5.38 – Sistema Teste 4a no DPTS.

Os TCRs que compõem os SVCs mostrados na Figura 5.38 estão conectados em delta. Maiores detalhes deste sistema são apresentados no Apêndice B.

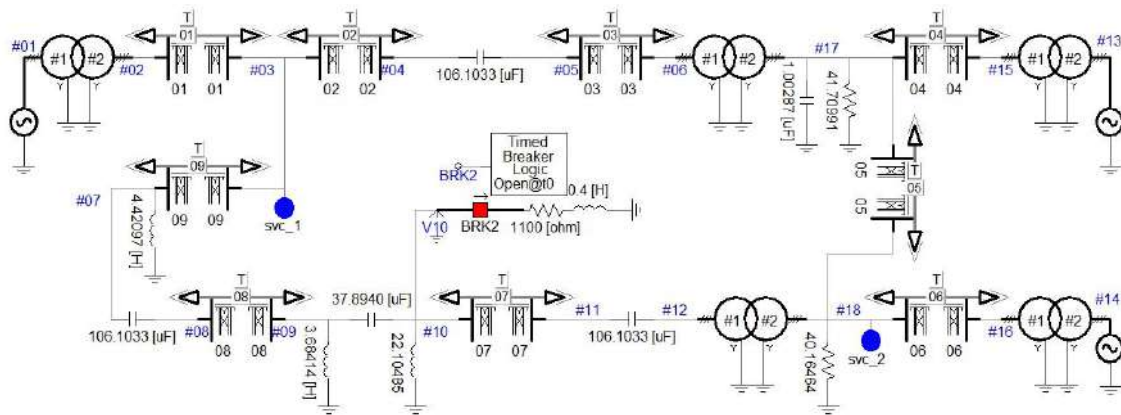


Figura 5.39 – Sistema Teste 4a no PSCAD.

Este mesmo sistema foi implementado no PSCAD, conforme mostrado na Figura 5.39. Os resultados das simulações são mostrados a seguir, onde são aplicados os seguintes eventos: Em $t = 50$ ms a conexão de uma carga RL ($R=1,1$ k Ω e $L=0,4$ H) na barra “10”; Em $t = 300$ ms o degrau de -2% na referência do controle de tensão do SVC 2; Em $t = 400$ ms o degrau de +2% na referência do controle de tensão do SVC 1.

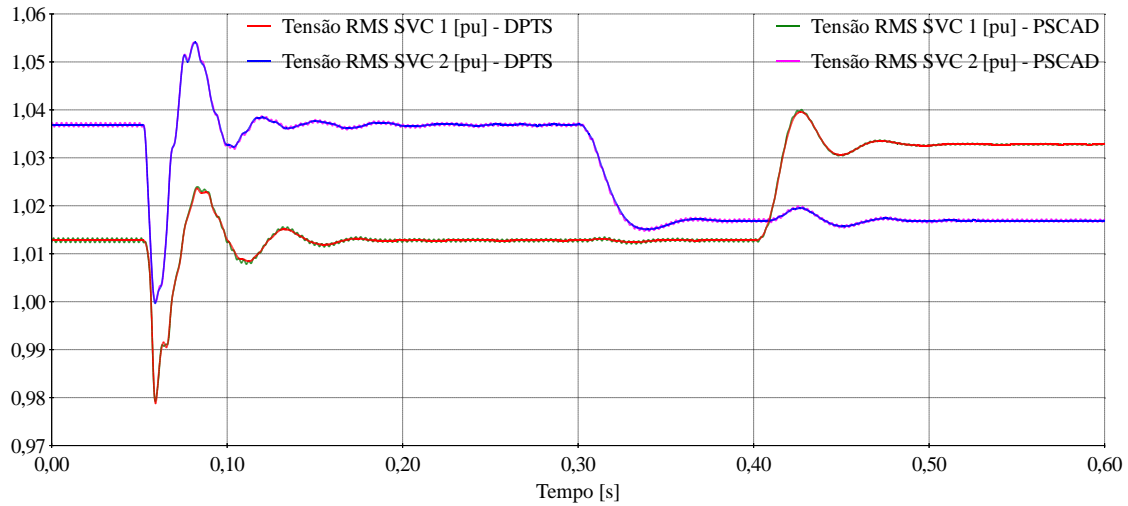


Figura 5.40 – Comparação do DPTS com PSCAD: tensões RMS dos SVCs 1 e 2.

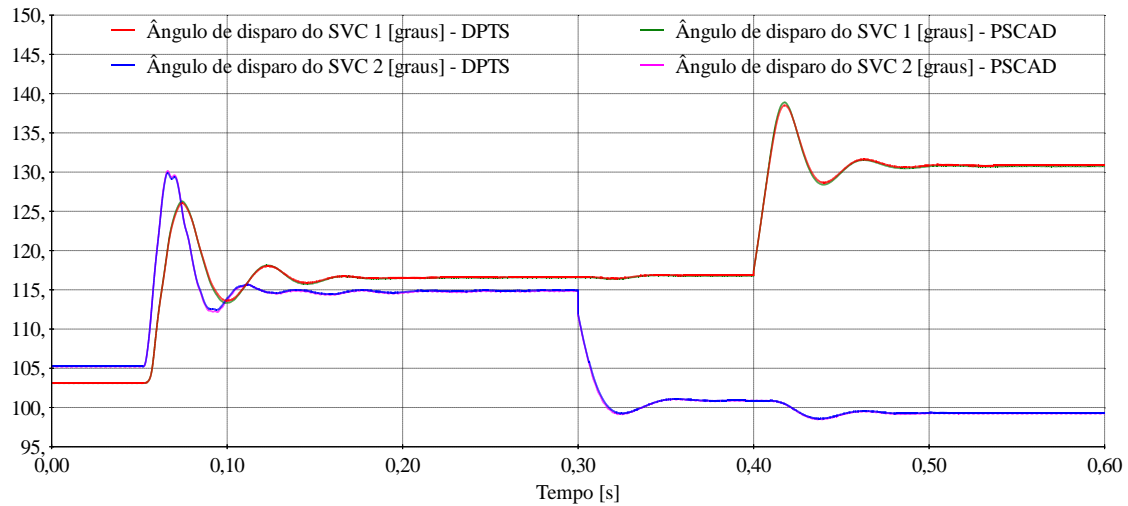


Figura 5.41 – Comparação do DPTS com PSCAD: ângulos de disparo dos SVCs 1 e 2.

A Figura 5.40 e a Figura 5.41 apresentam os resultados da validação com o PSCAD, onde observa-se que as curvas em ambos simuladores são praticamente coincidentes.

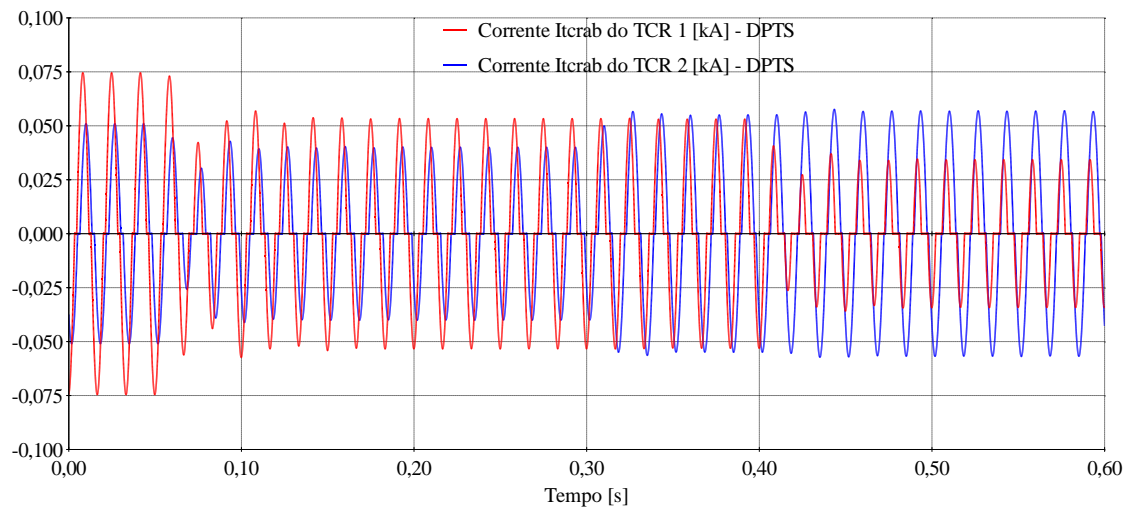


Figura 5.42 – Correntes $i_{tcrab}(t)$ dos SVCs 1 e 2 no DPTS.

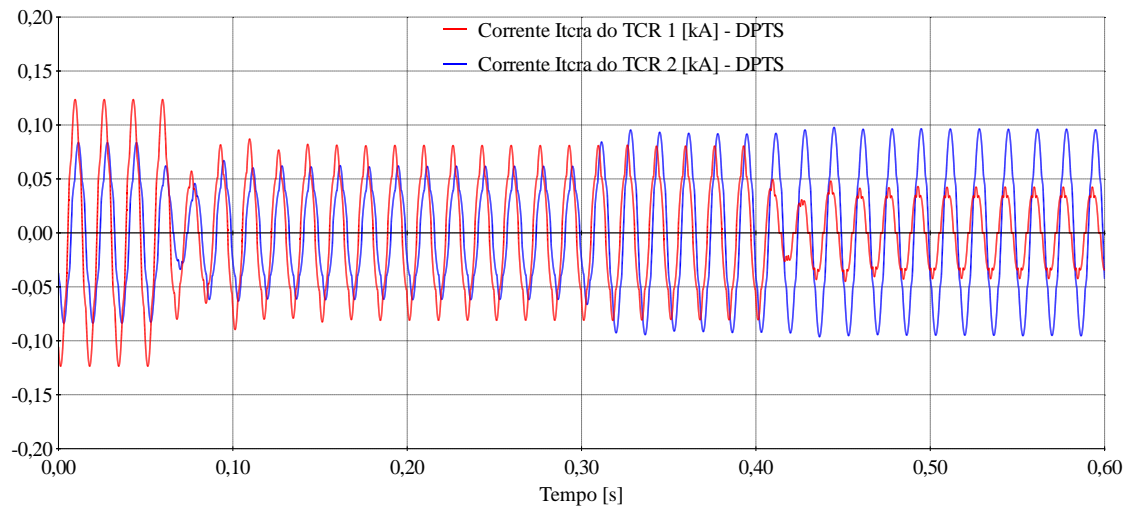


Figura 5.43 – Correntes $i_{tcrab}(t)$ dos SVCs 1 e 2.

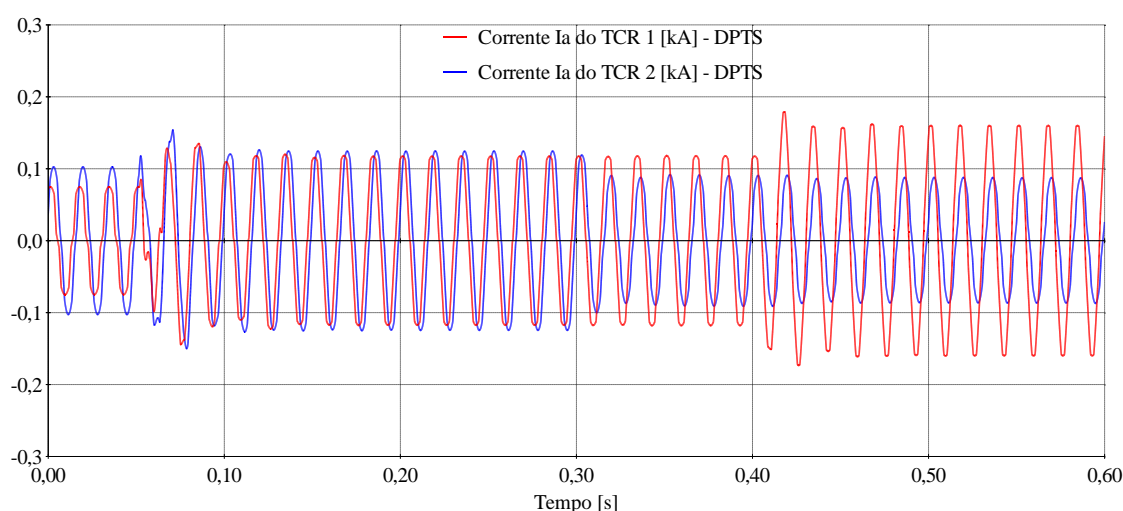


Figura 5.44 – Correntes $i_a(t)$ dos SVCs 1 e 2 no DPTS.

Da Figura 5.42 até a Figura 5.44 são apresentados os valores instantâneos das correntes nos SVCs 1 e 2. Ressalta-se aqui que na próxima seção será apresentado o DPTS considerando os harmônicos do TCR. A seguir, foram simulados chaveamentos da carga RL na barra “10” variando-se o passo de integração Δt com o objetivo de verificar qual é o efeito da variação do passo na resposta do DPTS para este caso.

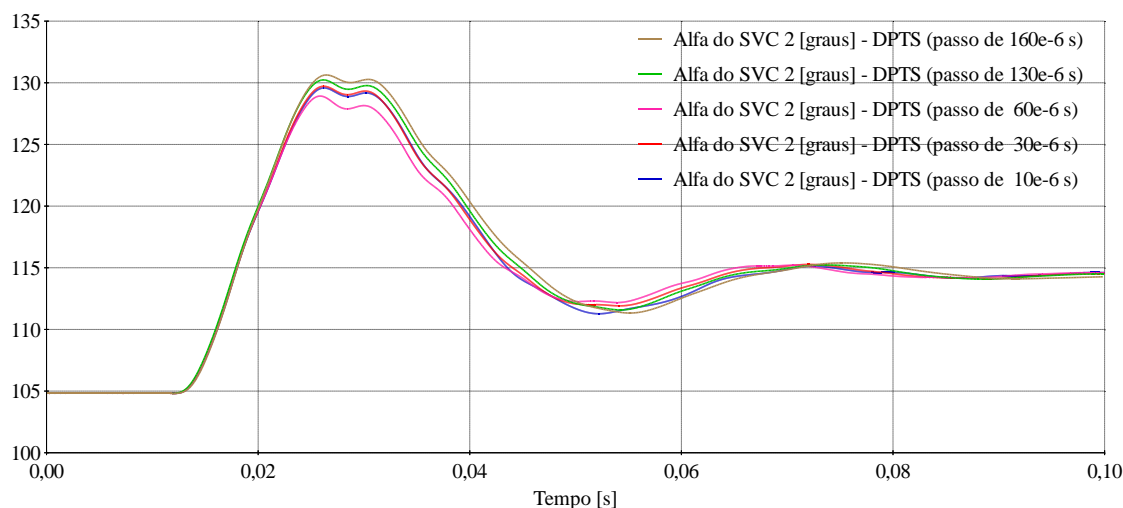


Figura 5.45 – Ângulo de disparo do SVC 2 para diferentes passos de integração no DPTS.

Na Figura 5.45 são apresentadas curvas de simulação DPTS do ângulo de disparo do SVC 2 para os valores de passo iguais a 160 μ s, 130 μ s, 60 μ s, 30 μ s e 10 μ s. Ao longo do trabalho verificou-se que, para os Sistemas Teste simulados nesta tese, valores de passo de integração entre 10 μ s e 30 μ s são satisfatórios.

5.7 DPTS considerando harmônicos do TCR

Nesta seção são apresentados os resultados da implementação do método de simulação de fasores dinâmicos DPTS com modelagem de harmônicos, de modo que os harmônicos [ARRILLAGA 1997], [ARRILLAGA 2003] gerados pelos equipamentos chaveados do sistema possam ser adequadamente considerados. O Sistema Teste 2c foi utilizado para a realização de simulações do DPTS considerando os harmônicos do TCR. Maiores detalhes deste sistema são apresentados no Apêndice B. Nesta simulação, a resistência entre as barras 12 e 13 tem valor igual a 450Ω , os ganhos considerados para o controlador PI do controle de tensão do TCR foram $K_{P-PI} = 1,0$ e $K_{I-PI} = 1000$. O evento considerado foi o fechamento da chave 10-12 em $t=20\text{ms}$. O passo de tempo utilizado foi $\Delta t = 25 \mu\text{s}$.

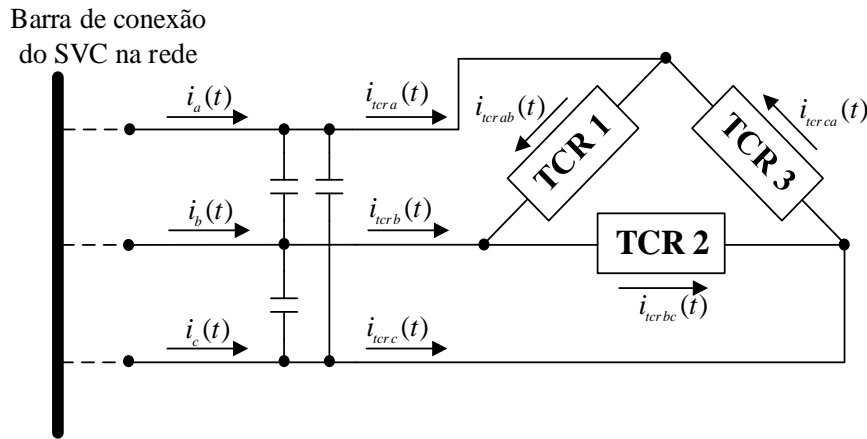


Figura 5.46 – Convenção de correntes do modelo SVC no DPTS.

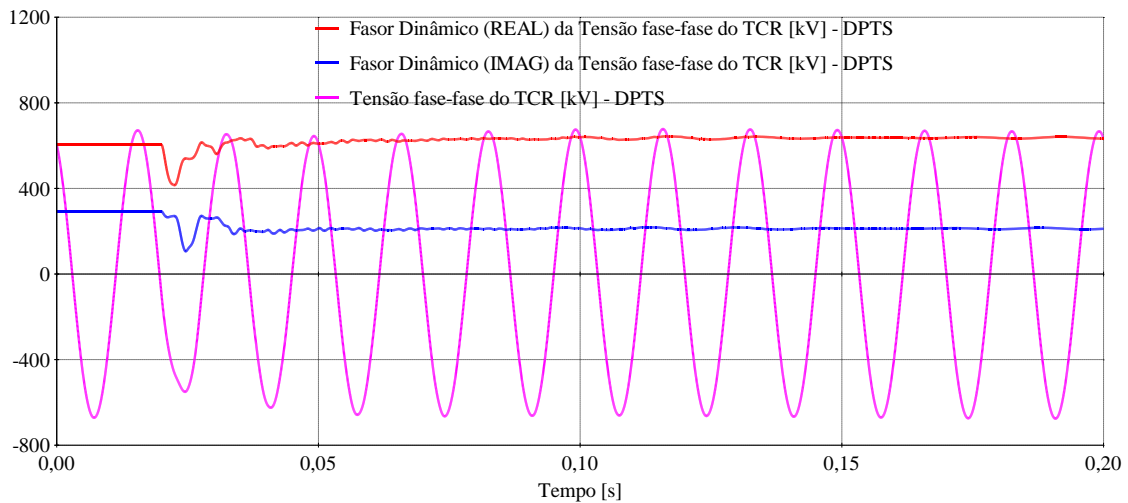


Figura 5.47 – Fasores dinâmicos (real e imaginário) da tensão fase-fase do TCR.

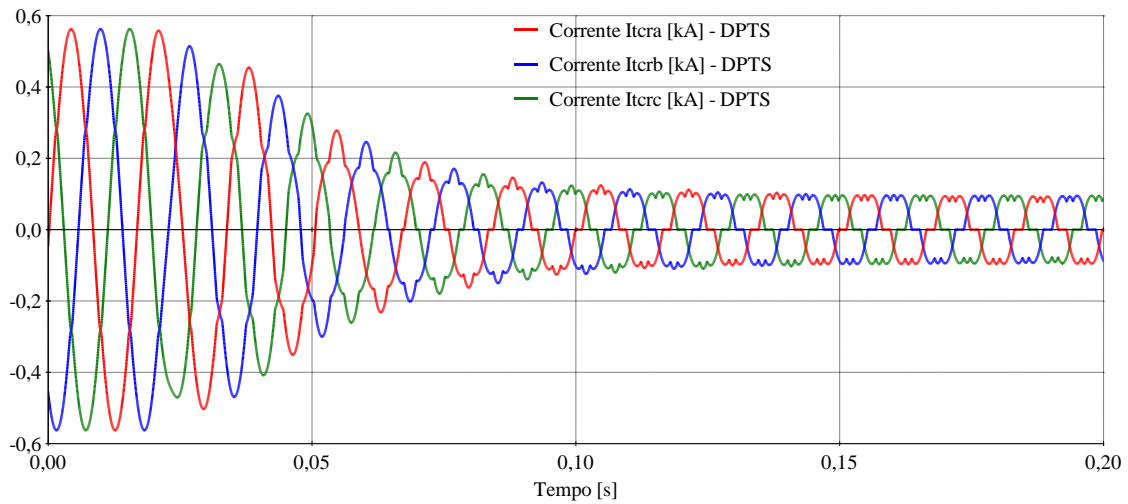


Figura 5.48 – Correntes trifásicas do TCR simulado no DPTS.

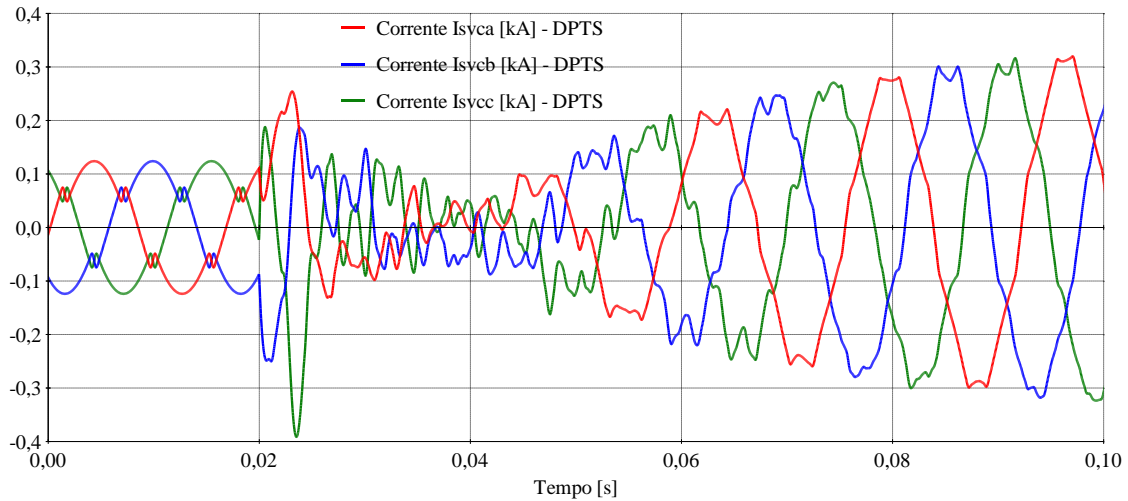


Figura 5.49 – Correntes trifásicas do SVC simulado no DPTS.

Da Figura 5.47 até a Figura 5.49 são apresentados respectivamente os fasores dinâmicos (real e imaginário) da tensão fase-fase do TCR, as correntes trifásicas i_{tcr} e i_{svc} . Foram considerados harmônicos até os de ordem 43.

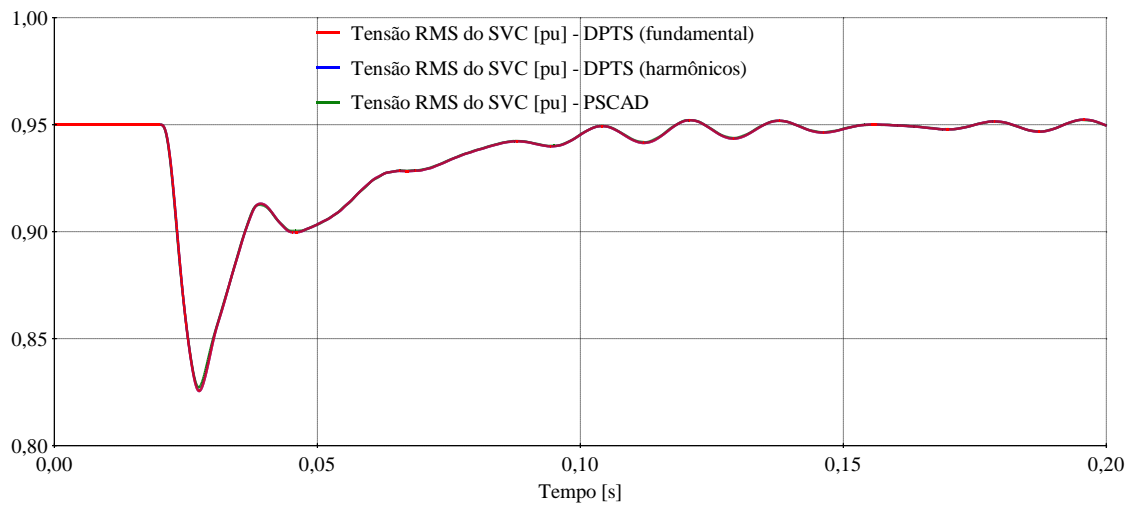


Figura 5.50 – Comparação da tensão RMS do SVC.

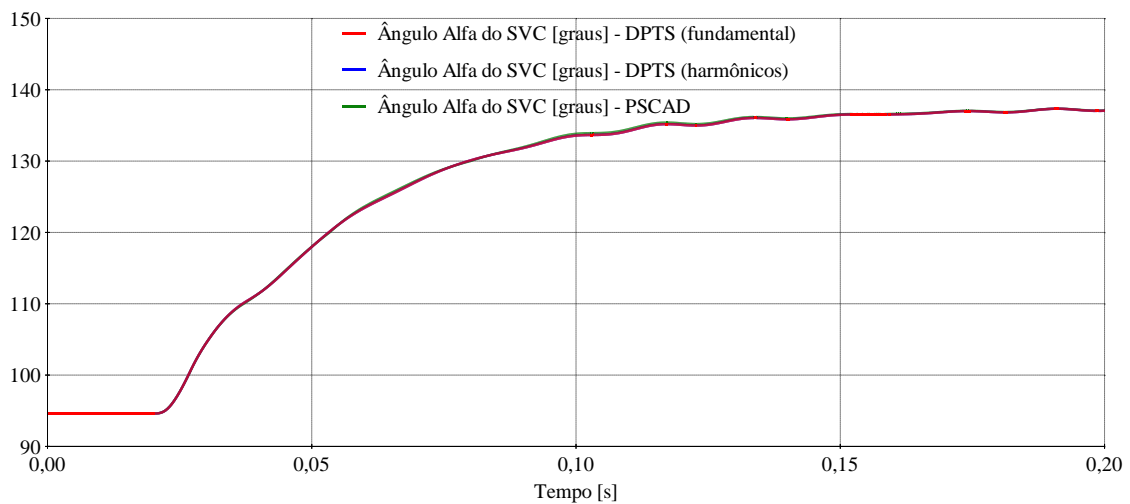


Figura 5.51 – Comparação do ângulo de disparo do SVC.

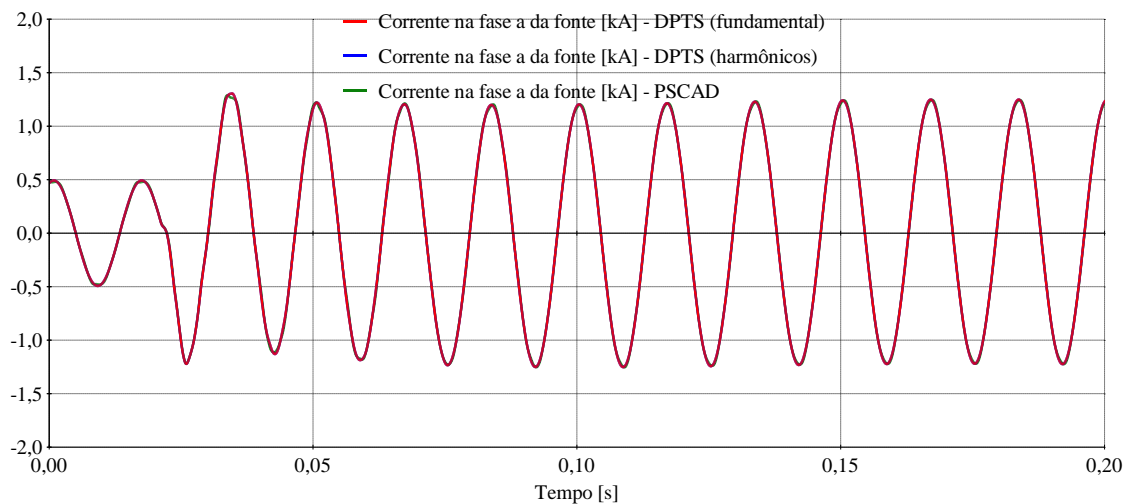


Figura 5.52 – Comparação da corrente na fase a da fonte do sistema.

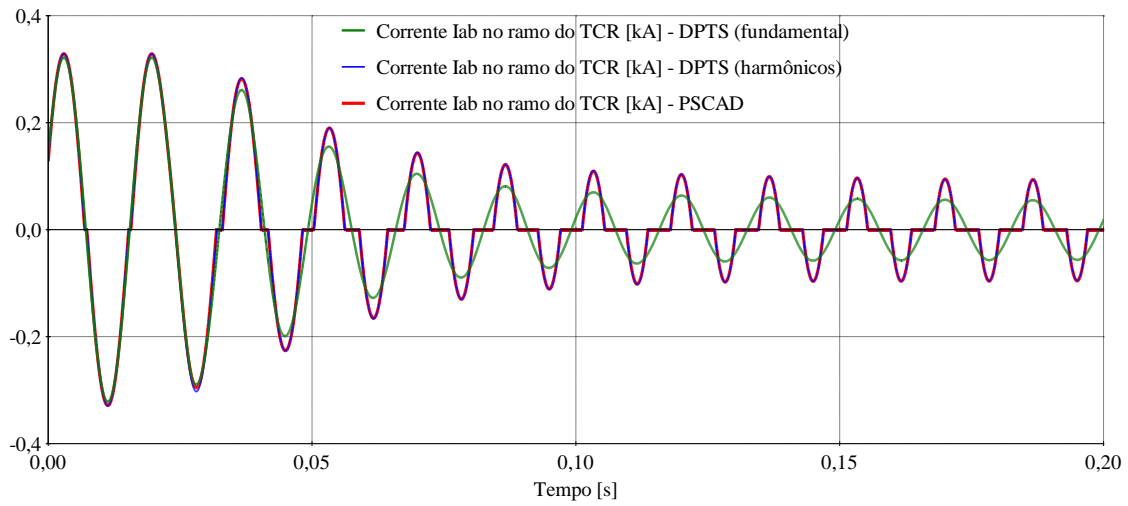


Figura 5.53 – Comparação da corrente i_{ab} no ramo do TCR.

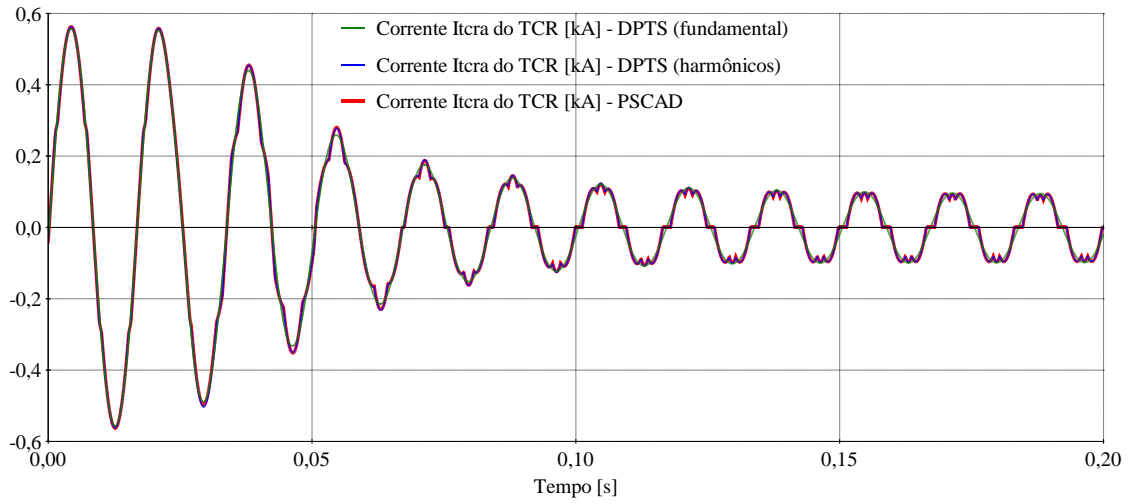


Figura 5.54 – Comparação da corrente i_{tcr} do TCR.

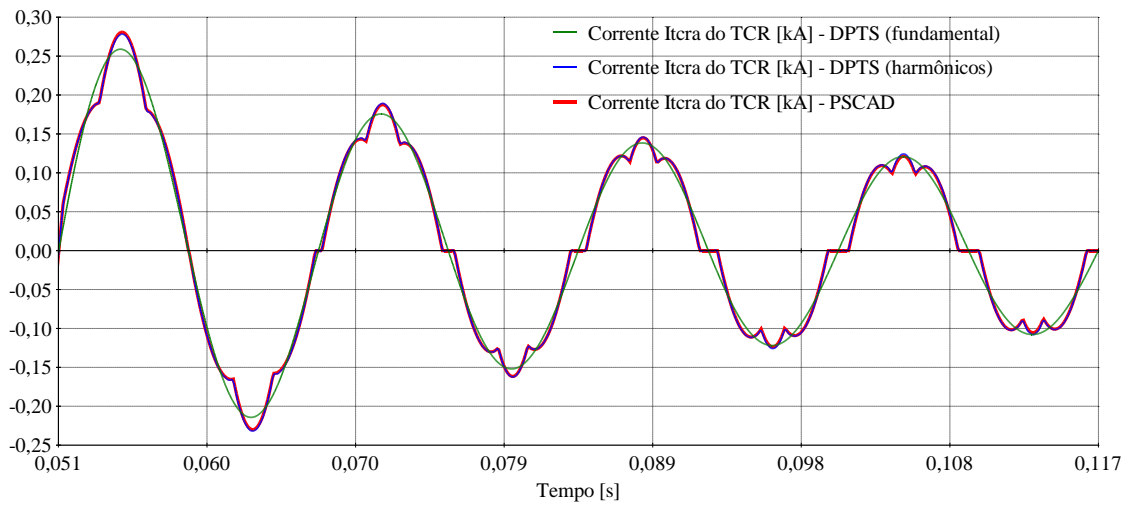


Figura 5.55 – Comparação da corrente i_{tcr} do TCR (*zoom* detalhando harmônicos).

Da Figura 5.50 até a Figura 5.55 são apresentadas as comparações entre o DPTS considerando-se apenas os fasores dinâmicos de frequência fundamental, o DPTS considerando-se os fasores harmônicos e o PSCAD/EMTDC. Verifica-se que o modelo de frequência fundamental pode ser considerado uma boa aproximação do comportamento do TCR para estudos envolvendo ajustes de controle [LIRIO 2007a].

5.8 DPTS considerando harmônicos na rede

Nesta seção são apresentados os resultados da implementação do método de simulação de fasores dinâmicos DPTS com modelagem de harmônicos da rede. Para isto utilizou-se o Sistema Teste 3d, cujo detalhamento e o arquivo de dados utilizado encontram-se no Apêndice B. O evento considerado nas simulações foi um degrau de -5% na referência V_{ref} do controle de tensão do SVC em $t=10$ ms. Os ganhos do controlador PI do controle de tensão do SVC considerados são $K_{P-PI} = 0,05$ e $K_{I-PI} = 100$. Optou-se por ganhos mais elevados para o SVC de modo a estressar o método DPTS tornando, inclusive, o sistema instável para a perturbação aplicada. Inicialmente simulou-se o DPTS considerando-se os fasores dinâmicos harmônicos do SVC, sendo a ordem do harmônico de maior frequência igual a 43 e a rede contendo apenas os fasores dinâmicos de frequência fundamental.

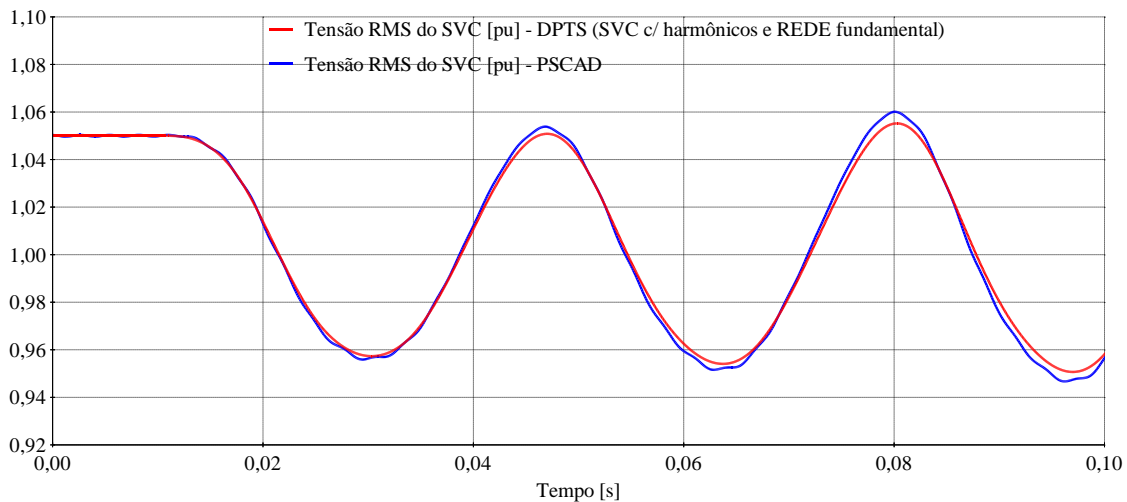


Figura 5.56 – Comparação DPTS (sem harmônicos na rede) e PSCAD: tensão RMS.

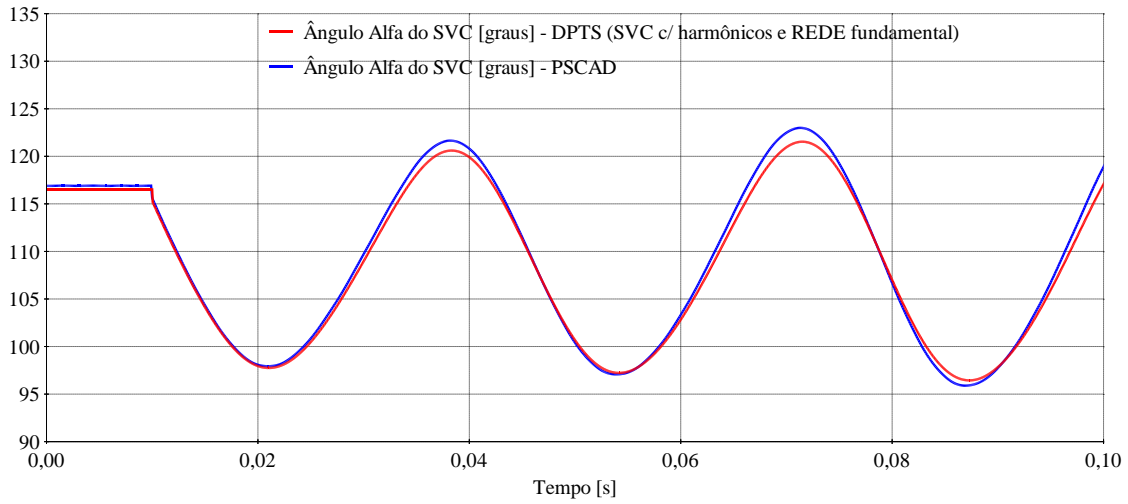


Figura 5.57 – Comparação DPTS (sem harmônicos na rede) e PSCAD: ângulo Alfa.

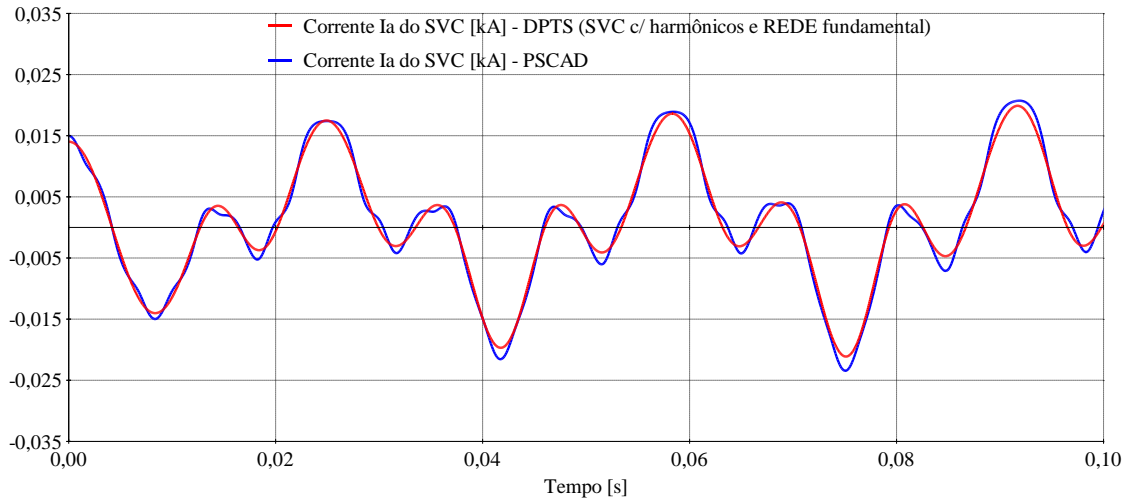


Figura 5.58 – Comparação DPTS (sem harmônicos na rede) e PSCAD: corrente $i_a(t)$.

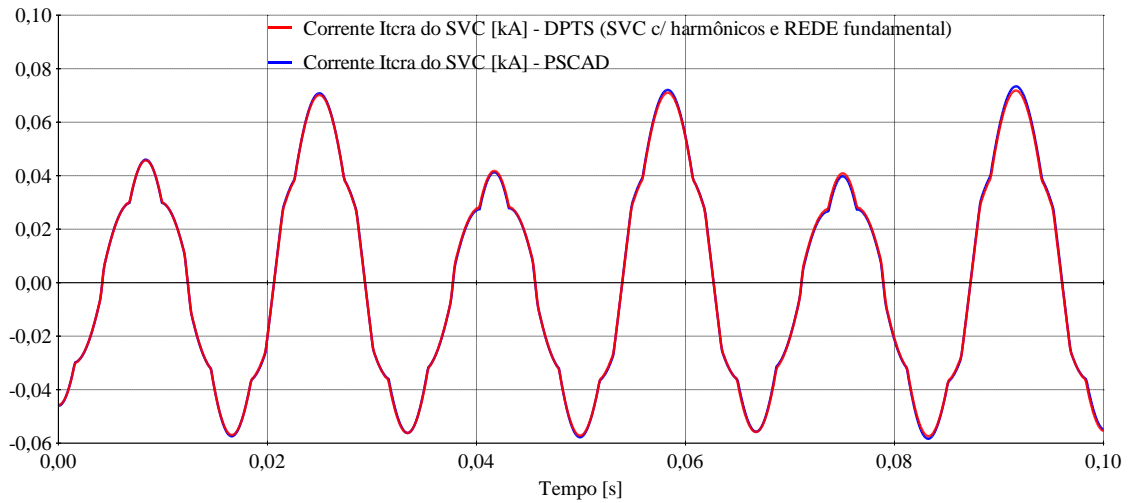


Figura 5.59 – Comparação DPTS (sem harmônicos na rede) e PSCAD: corrente $i_{tcra}(t)$.

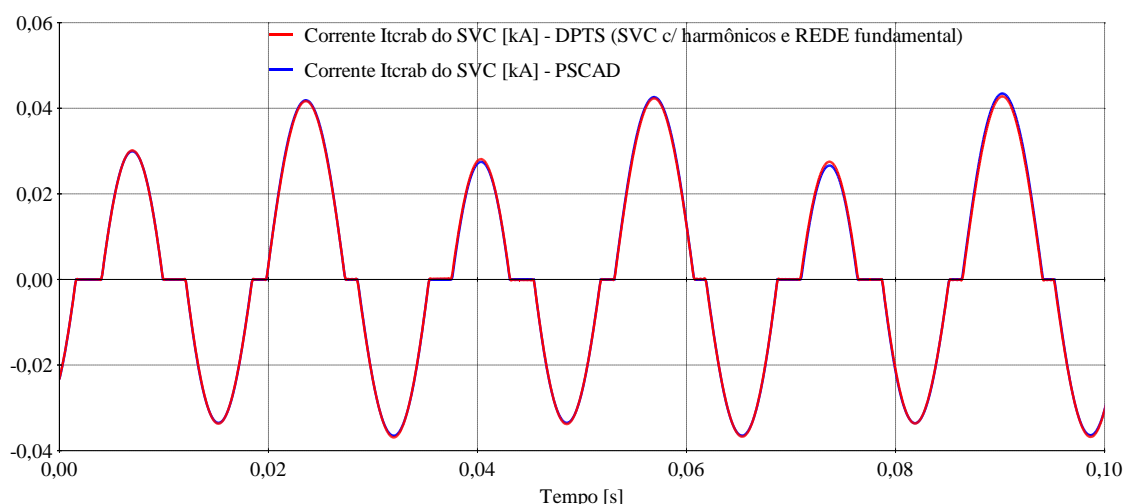


Figura 5.60 – Comparação DPTS (sem harmônicos na rede) e PSCAD: corrente $i_{tcrab}(t)$.

Da Figura 5.56 até a Figura 5.60 tem-se os resultados das simulações comparativas entre DPTS (sem harmônicos na rede) e PSCAD. Os nomes das correntes no SVC obedecem a convenção da Figura 5.46. As curvas apresentam um bom grau de semelhança entre si, contudo observa-se que a corrente $i_a(t)$ simulada no PSCAD possui um conteúdo harmônico que não está presente na curva do DPTS. Esta diferença entre as curvas é, em parte, justificada pela ausência da representação dos harmônicos da rede no DPTS. Para confirmar esta suspeita, simulou-se o mesmo Sistema Teste 3d no DPTS, porém considerando-se a inclusão dos fasores dinâmicos harmônicos da rede (além dos harmônicos do SVC que estão considerados). A seguir são apresentados os resultados desta comparação.

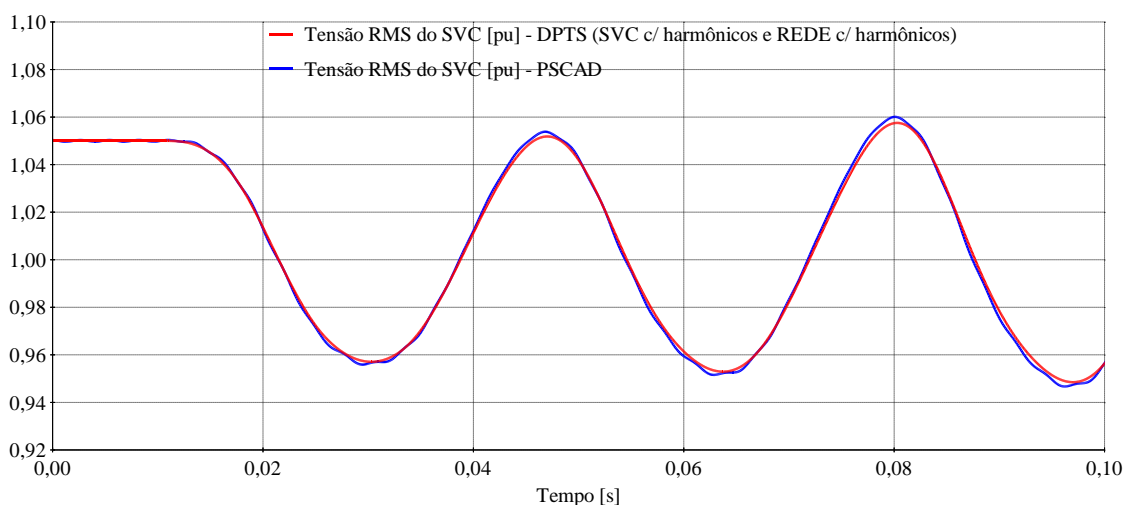


Figura 5.61 – Comparação DPTS (com harmônicos na rede) e PSCAD: tensão RMS.

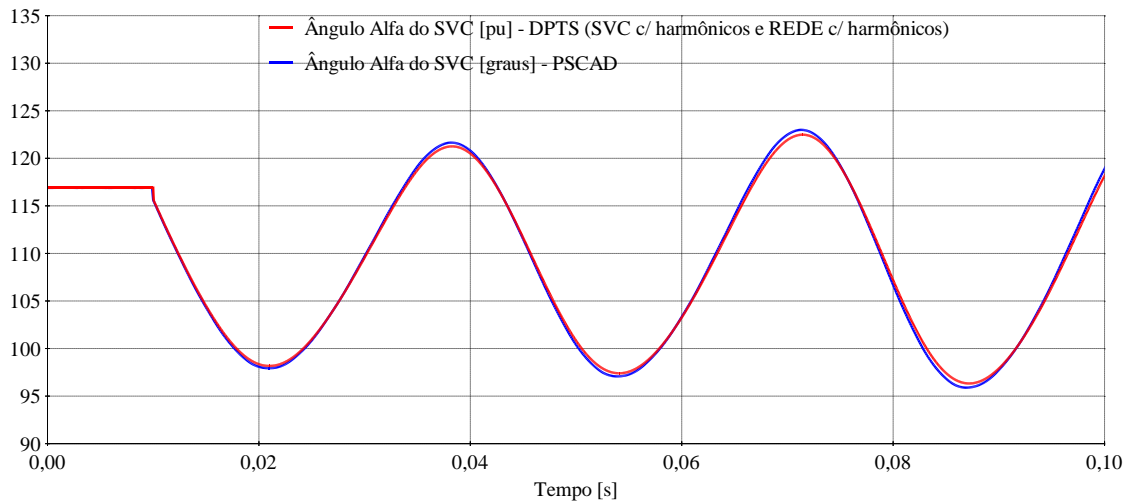


Figura 5.62 – Comparação DPTS (com harmônicos na rede) e PSCAD: ângulo Alfa.

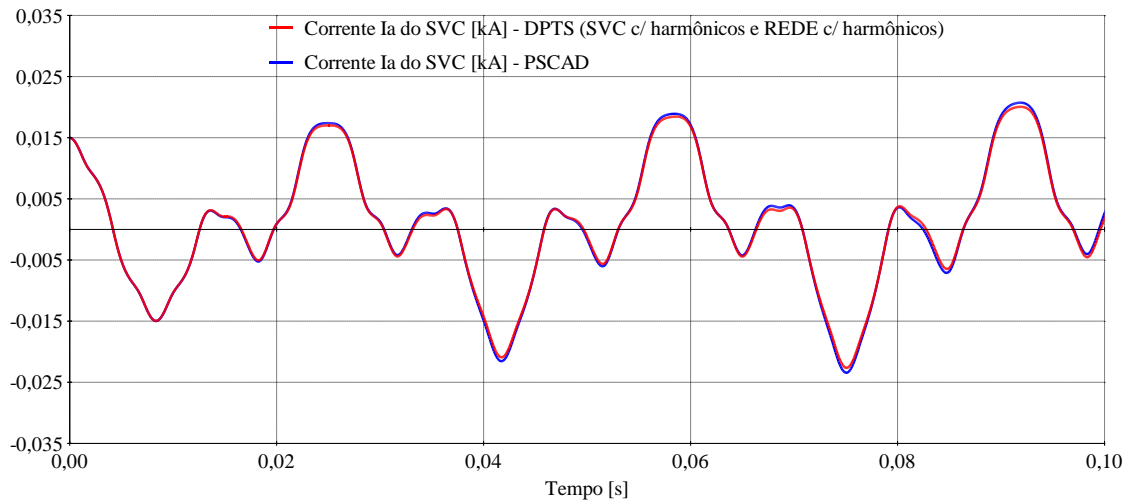


Figura 5.63 – Comparação DPTS (com harmônicos na rede) e PSCAD: corrente $i_a(t)$.

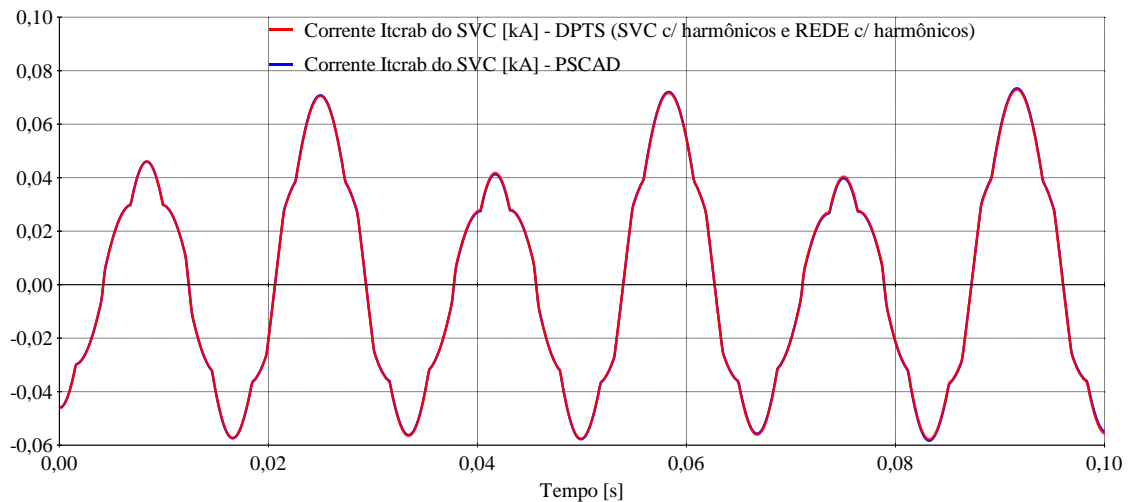


Figura 5.64 – Comparação DPTS (com harmônicos na rede) e PSCAD: corrente $i_{tcrab}(t)$.

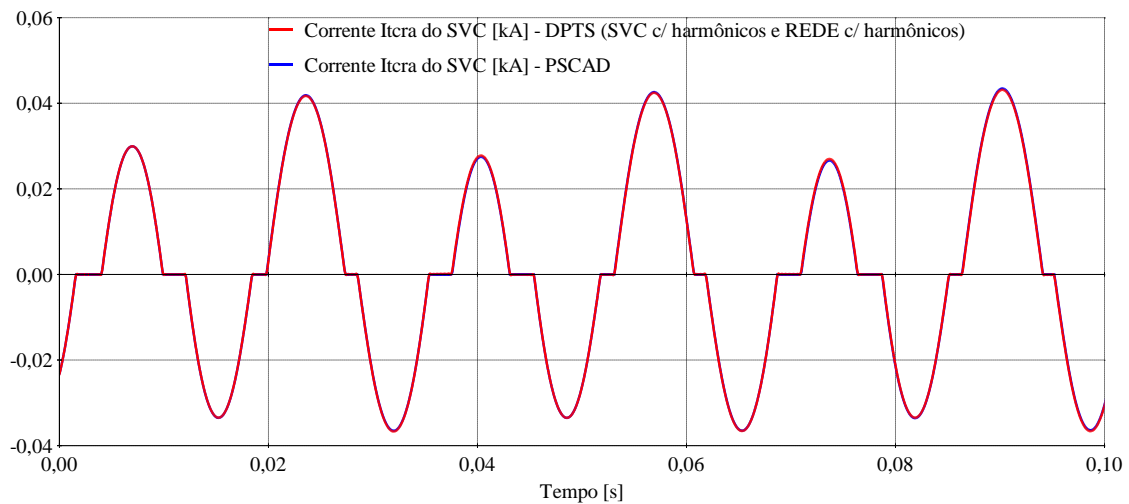


Figura 5.65 – Comparação DPTS (com harmônicos na rede) e PSCAD: corrente $i_{tcr}(t)$.

Da Figura 5.61 até a Figura 5.65 tem-se os resultados das simulações comparativas entre DPTS (com harmônicos na rede) e PSCAD. As curvas estão ainda mais semelhantes e a corrente $i_a(t)$ do PSCAD neste caso é praticamente idêntica à curva do DPTS, confirmando-se assim a hipótese supracitada.

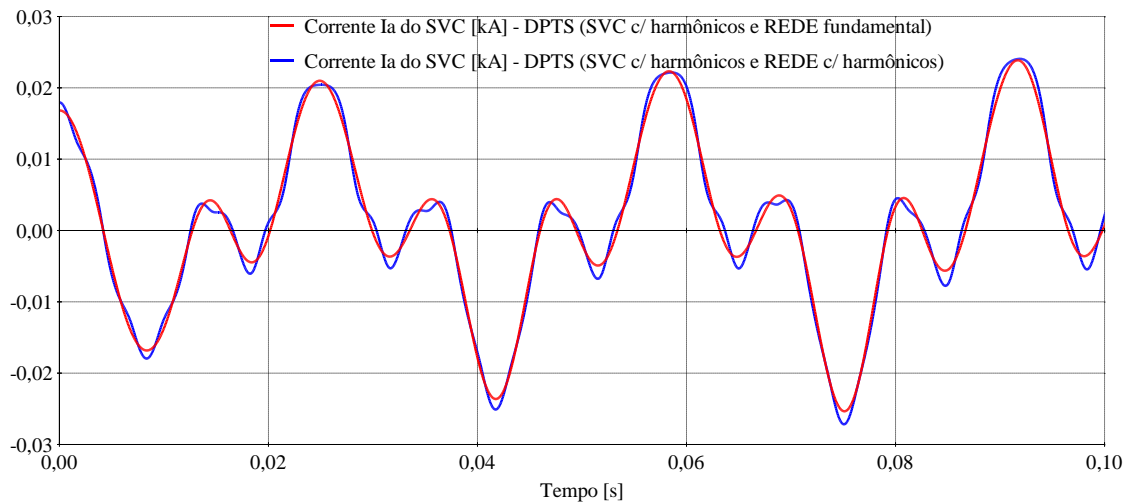


Figura 5.66 – Comparação da Corrente $i_a(t)$ no DPTS com e sem harmônicos na rede.

Na Figura 5.66 é possível observar em detalhes o efeito da inclusão dos harmônicos da rede na solução do DPTS.

5.9 DPTS considerando rede trifásica

Neste capítulo é abordada a metodologia e os aspectos principais para o desenvolvimento de uma modelagem trifásica para o simulador DPTS, o que viabilizaria a simulação por fasores dinâmicos de eventos desequilibrados, como curtos-circuitos monofásicos e a análise do comportamento dos harmônicos de componentes simétricas de sequência.

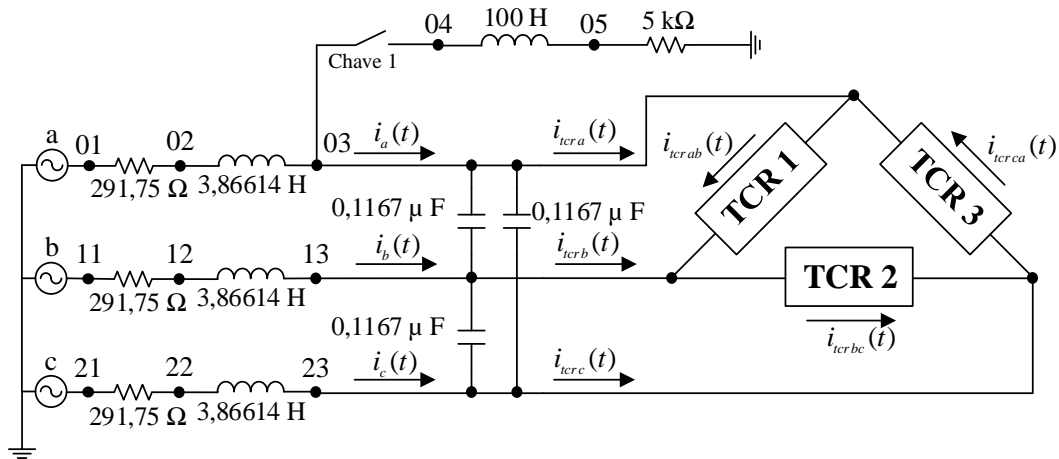


Figura 5.67 – Sistema Teste 3c no DPTS.

O Sistema Teste 3c foi utilizado para a realização de simulações do DPTS considerando rede trifásica, conforme mostrado na Figura 5.67. Os TCRs que compõem o SVC estão conectados em Δ . Maiores detalhes deste sistema são apresentados no Apêndice B. Este mesmo sistema teste foi implementado no PSCAD, conforme mostrado na Figura 5.68.

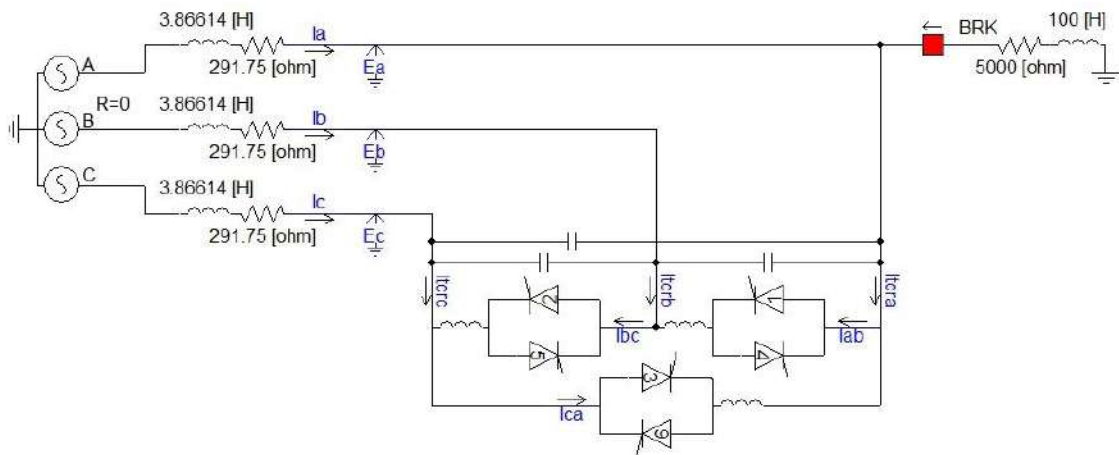


Figura 5.68 – Sistema Teste 3c no PSCAD.

O primeiro evento simulado é um degrau de -10% na referência V_{ref} do controle de tensão do SVC em $t=10\text{ms}$. O arquivo de dados utilizado para esta simulação é mostrado na Tabela B.8 do Apêndice B. O passo de tempo utilizado foi $\Delta t = 20 \mu\text{s}$.

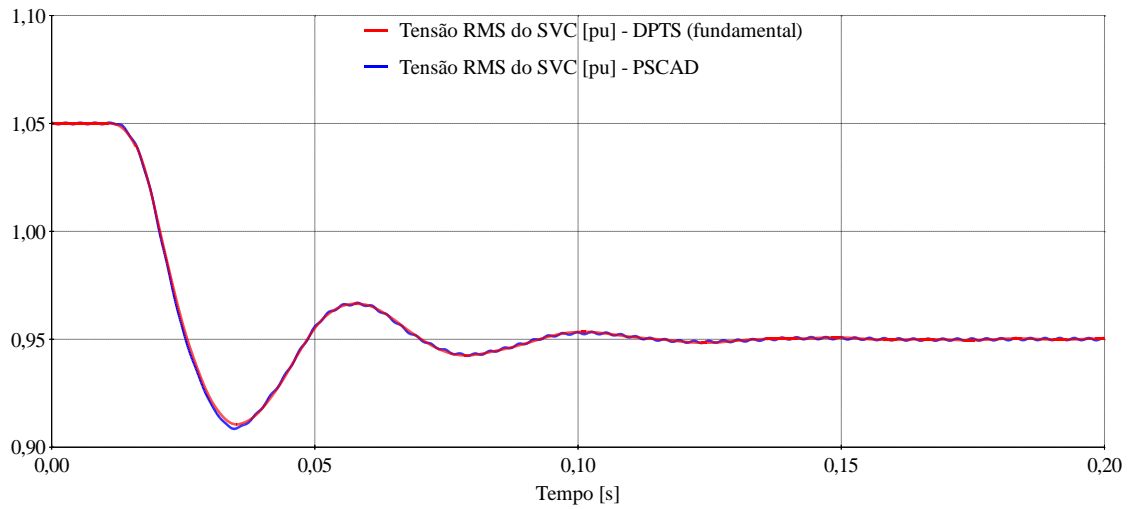


Figura 5.69 – Degrau de -10% em V_{ref} : tensão RMS do SVC.

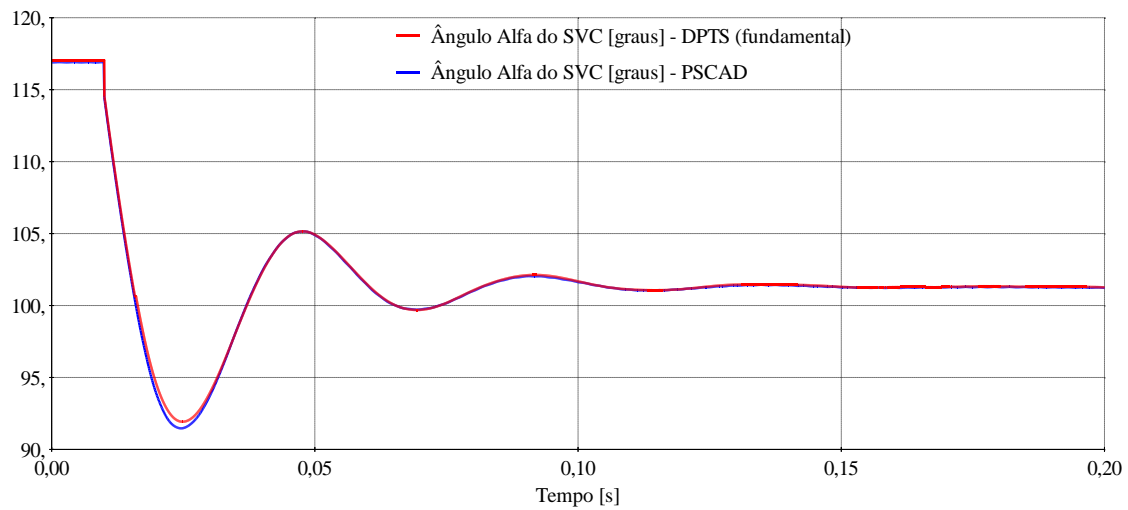


Figura 5.70 – Degrau de -10% em V_{ref} : ângulo de disparo do SVC.

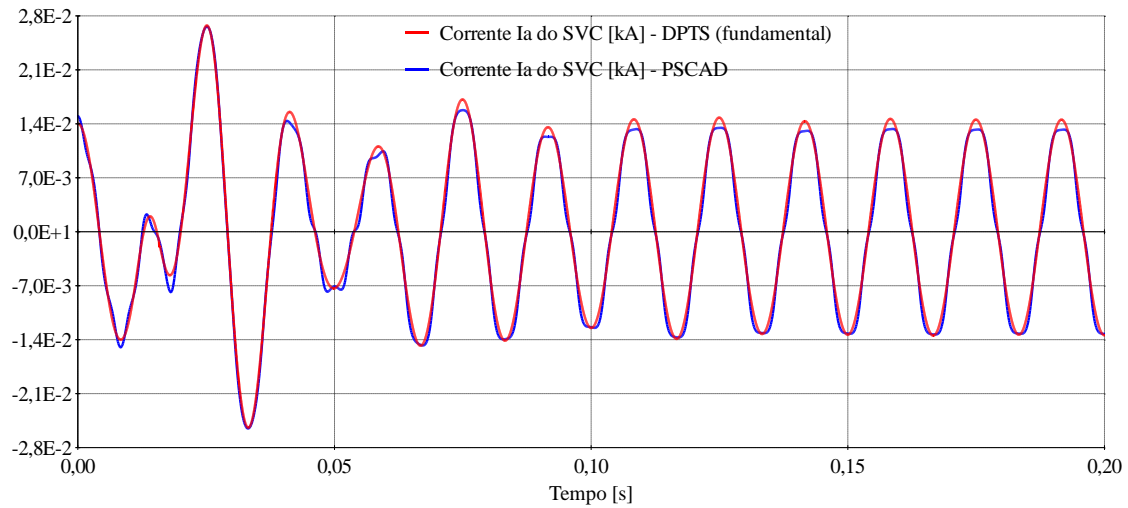


Figura 5.71 – Degrau de -10% em V_{ref} : corrente $i_a(t)$ do SVC.

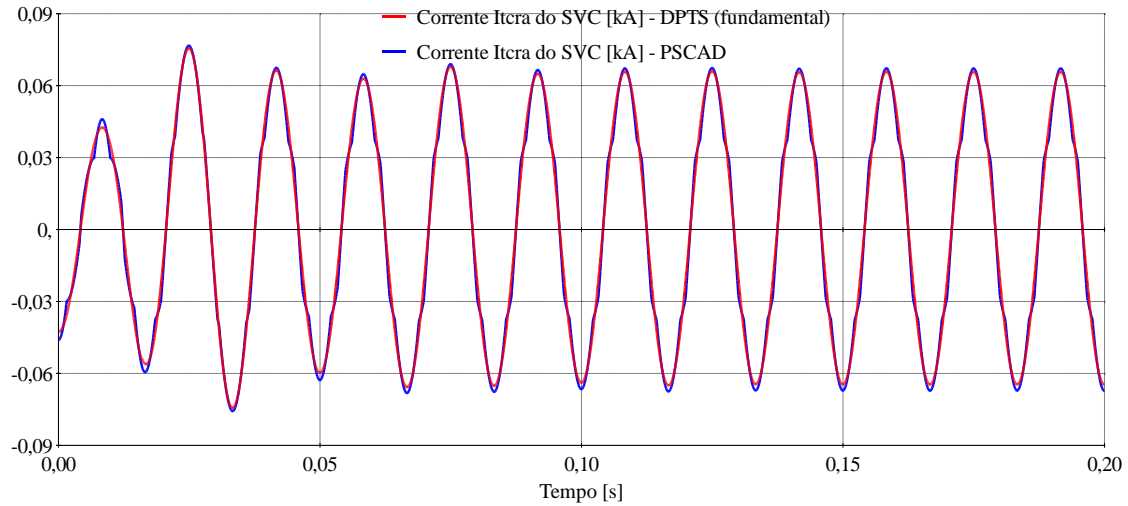


Figura 5.72 – Degrau de -10% em V_{ref} : corrente $i_{tcr}(t)$ do SVC.

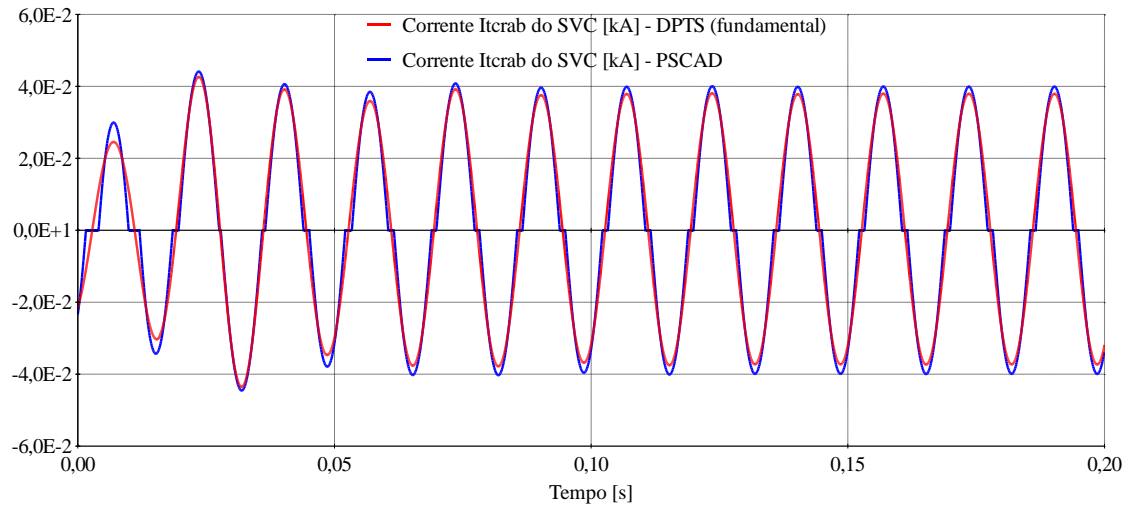


Figura 5.73 – Degrau de -10% em V_{ref} : corrente $i_{tcrab}(t)$ do SVC.

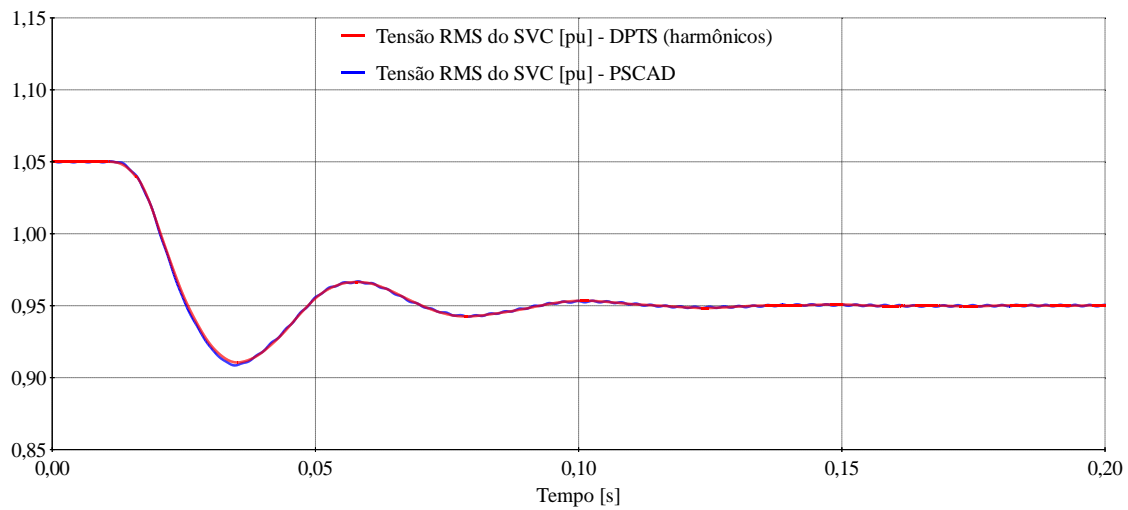


Figura 5.74 – Degrau de -10% em V_{ref} : tensão RMS do SVC.

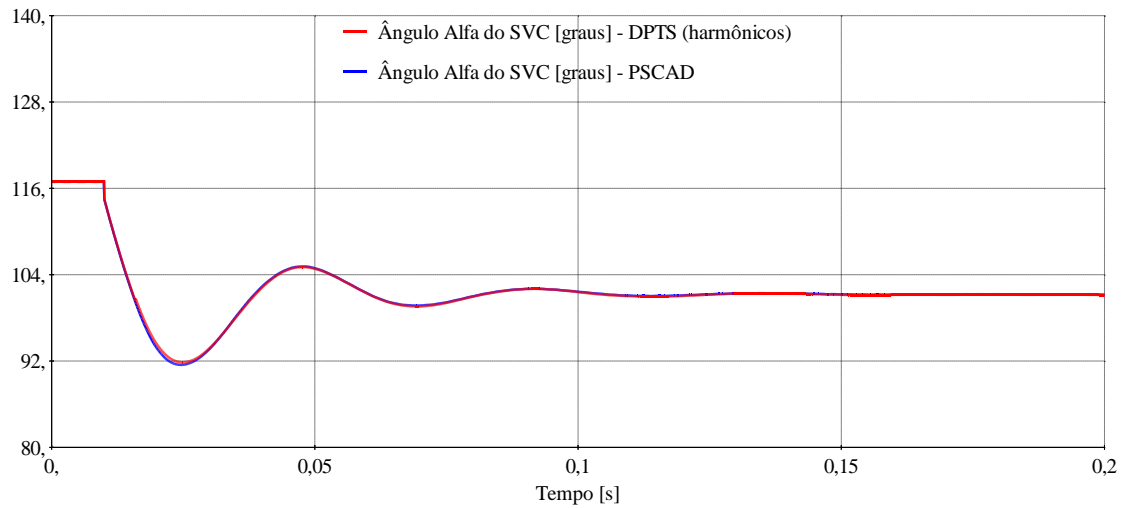


Figura 5.75 – Degrau de -10% em V_{ref} : ângulo de disparo do SVC.

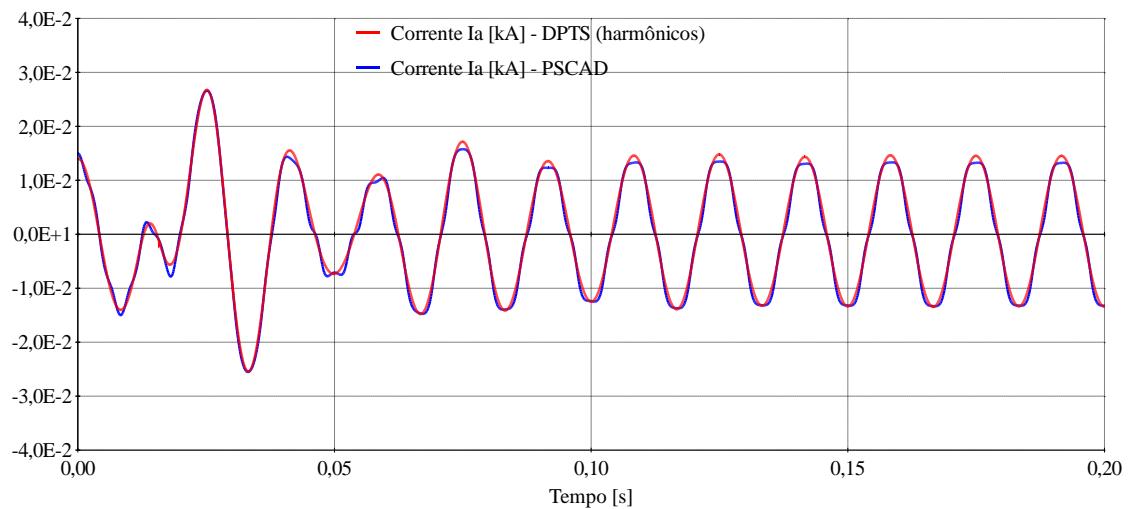


Figura 5.76 – Degrau de -10% em V_{ref} : corrente $i_a(t)$ do SVC.

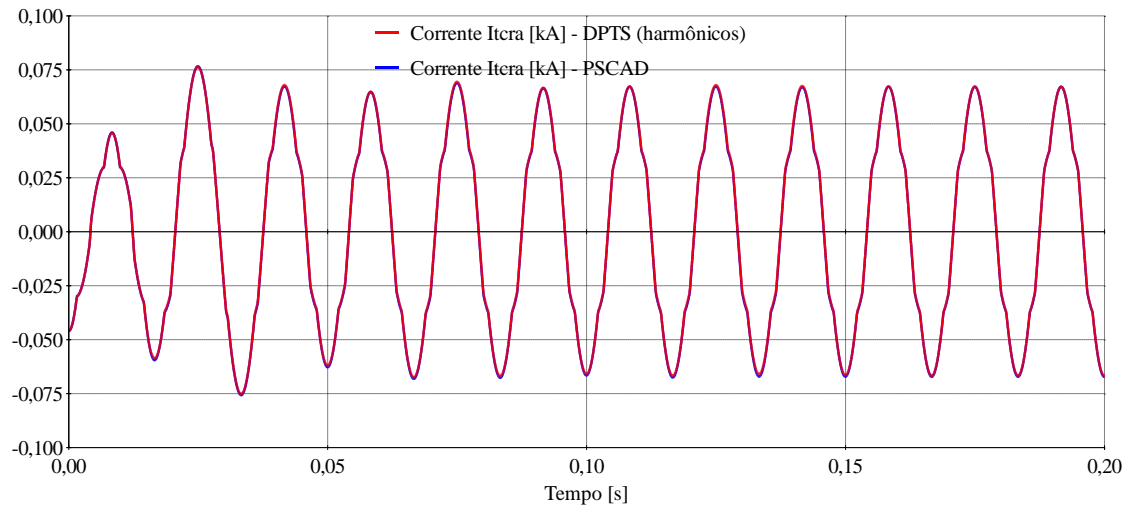


Figura 5.77 – Degrau de -10% em V_{ref} : corrente $i_{tcr}(t)$ do SVC.

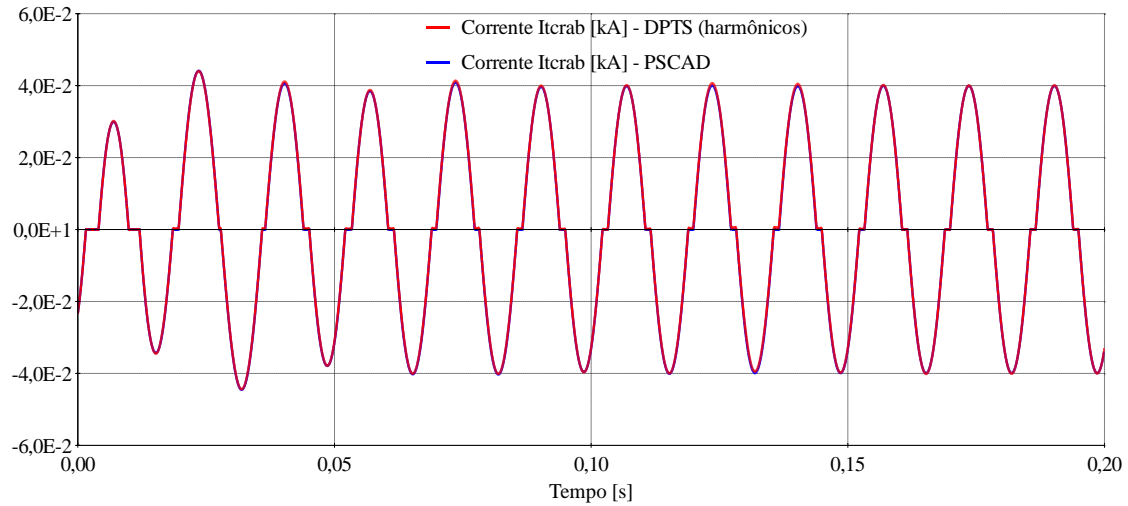


Figura 5.78 – Degrau de -10% em V_{ref} : corrente $i_{tcrab}(t)$ do SVC.

Da Figura 5.69 até a Figura 5.78 são apresentadas as simulações de validação do DPTS com o PSCAD. A seguir são apresentados os resultados da simulação de um degrau de +10% na referência V_{ref} do controle de tensão do SVC em $t=10$ ms. Nestas simulações considerou-se os harmônicos do SVC até o harmônico de ordem 43.

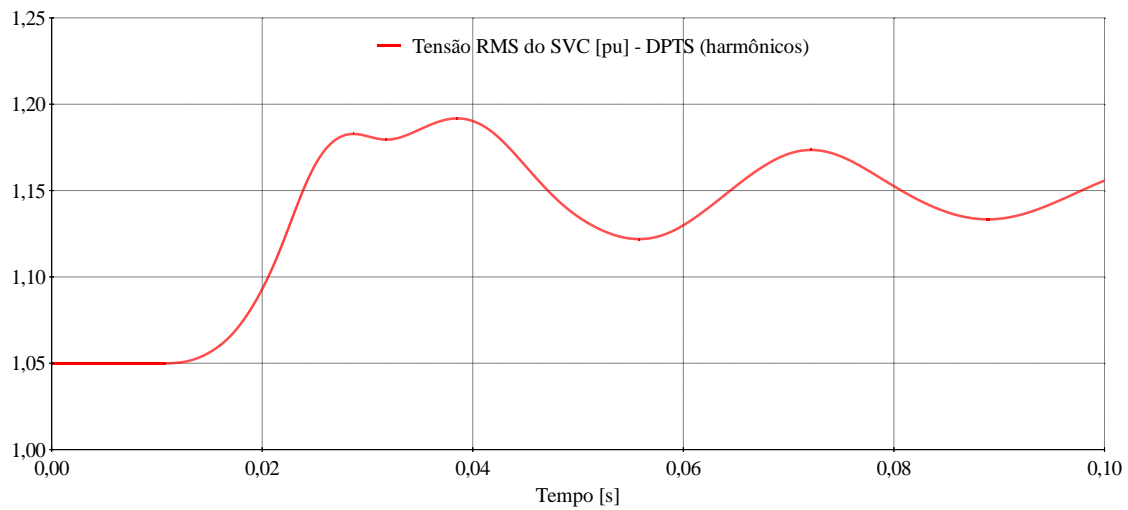


Figura 5.79 – Degrau de +10% em V_{ref} : tensão RMS do SVC.

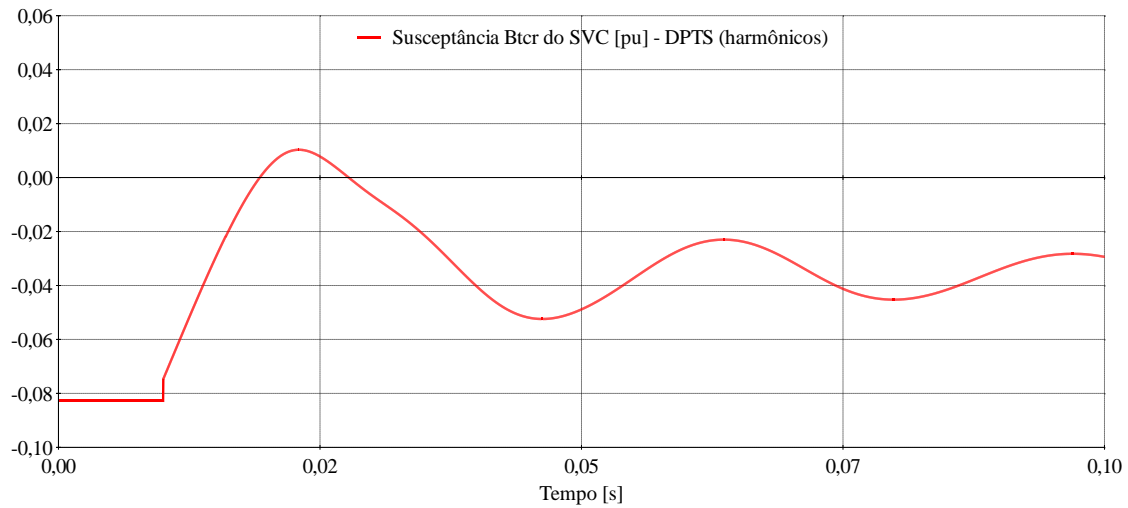


Figura 5.80 – Degrau de +10% em V_{ref} : susceptância $B_{tr}(t)$ do SVC.

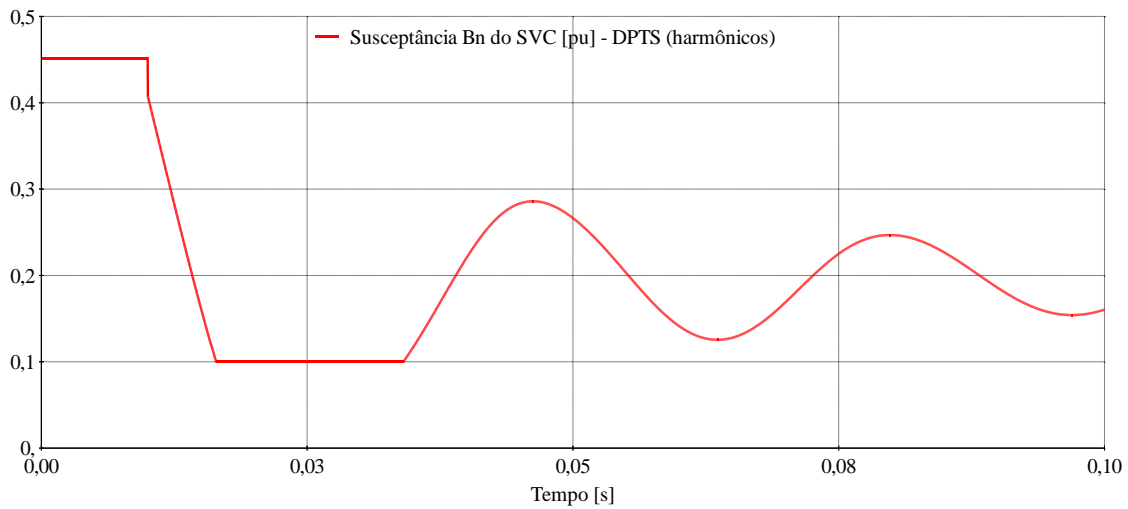


Figura 5.81 – Degrau de +10% em V_{ref} : susceptância $B_n(t)$ do SVC.

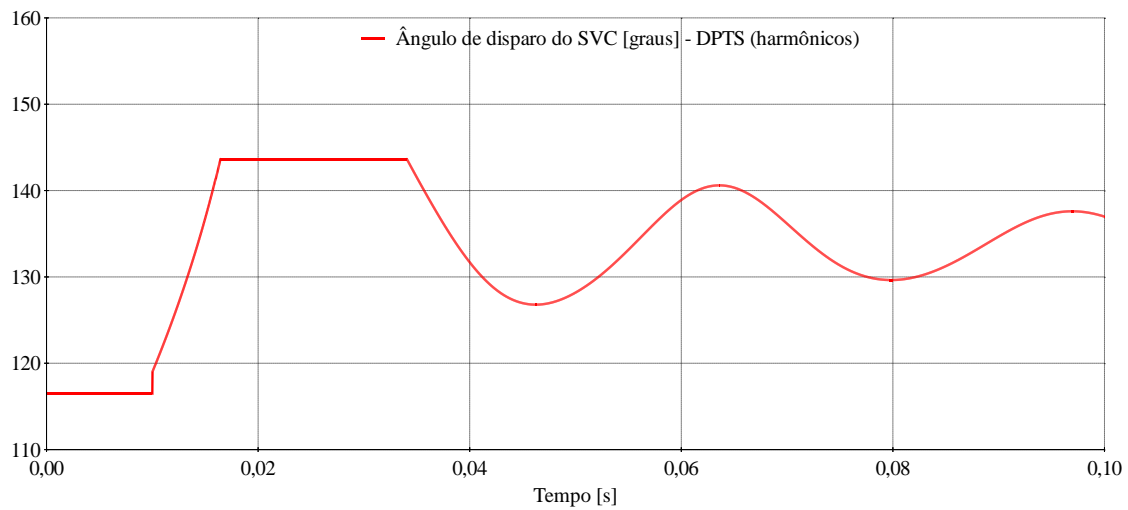


Figura 5.82 – Degrau de +10% em V_{ref} : ângulo de disparo do SVC.

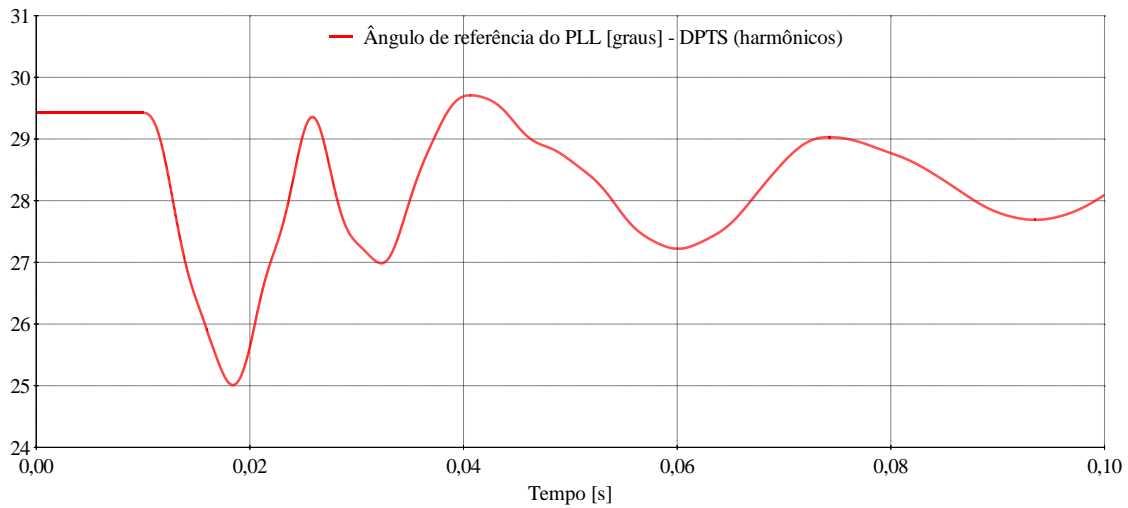


Figura 5.83 – Degrau de +10% em V_{ref} : ângulo de referência do PLL do SVC.

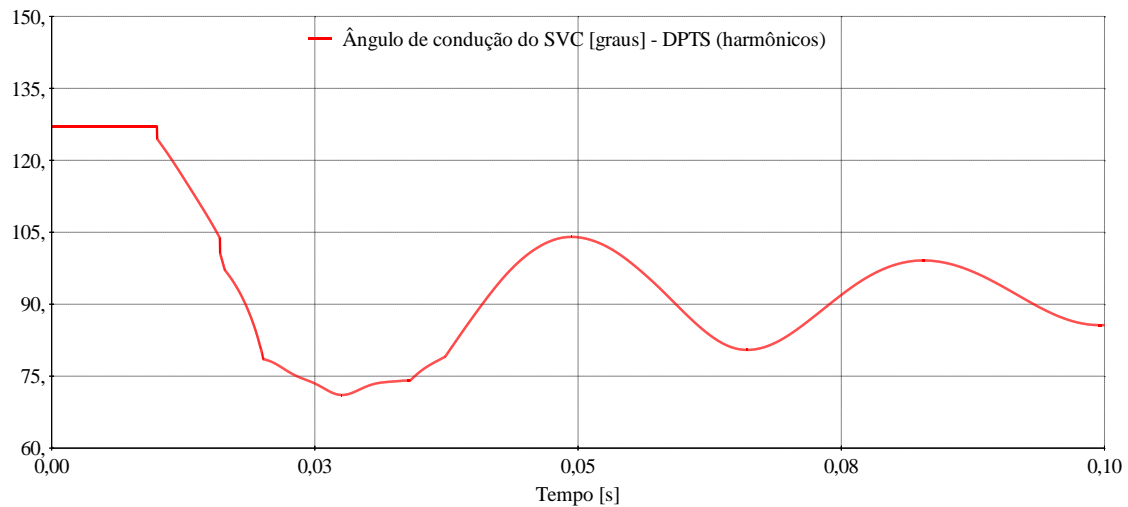


Figura 5.84 – Degrau de +10% em V_{ref} : ângulo de condução do SVC.

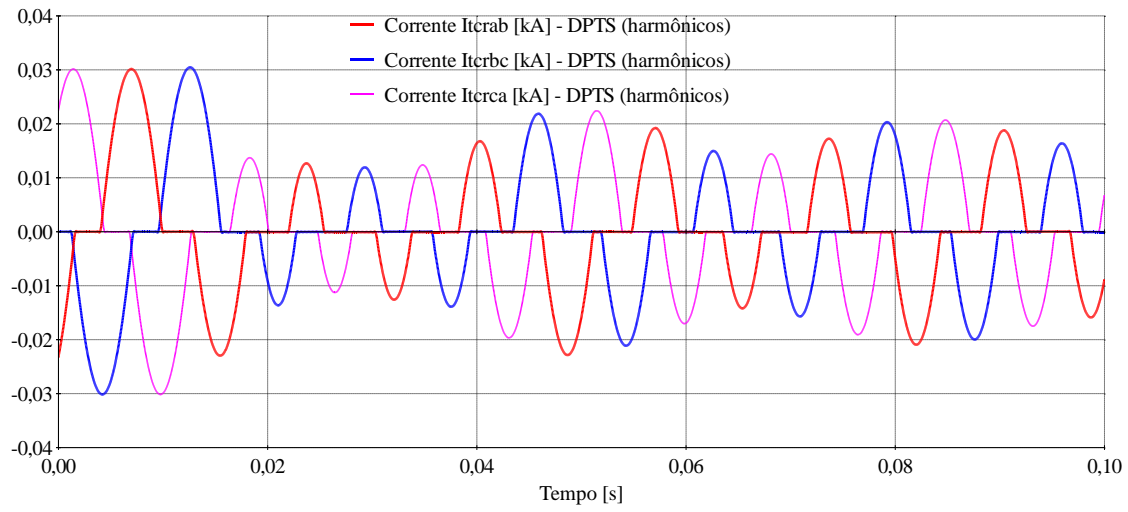


Figura 5.85 – Degrau de +10% em V_{ref} : correntes $i_{trab}(t)$, $i_{trbc}(t)$ e $i_{trca}(t)$ do SVC.

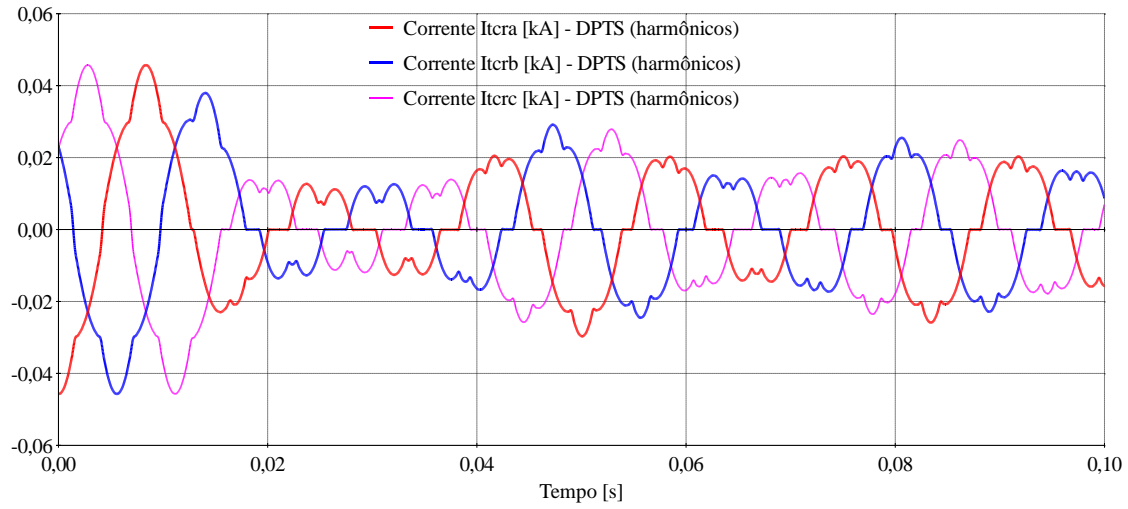


Figura 5.86 – Degrau de +10% em V_{ref} : correntes $i_{trca}(t)$, $i_{trcb}(t)$ e $i_{trc}(t)$ do SVC.

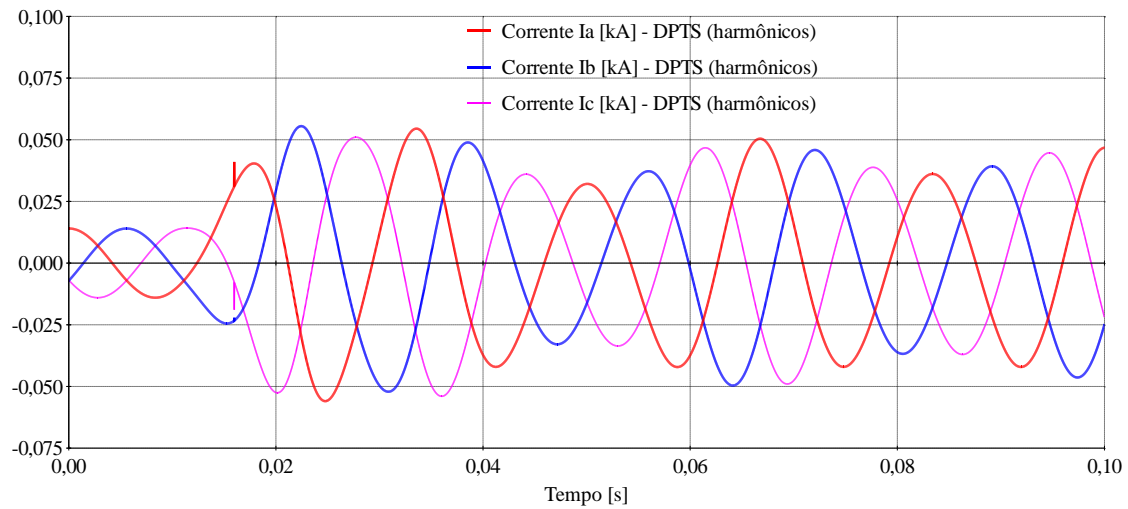
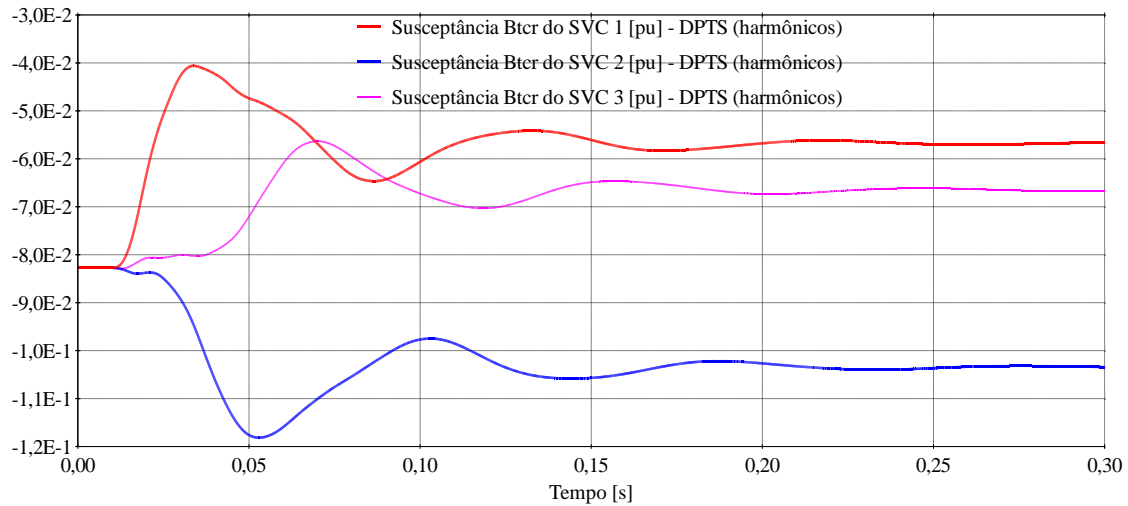
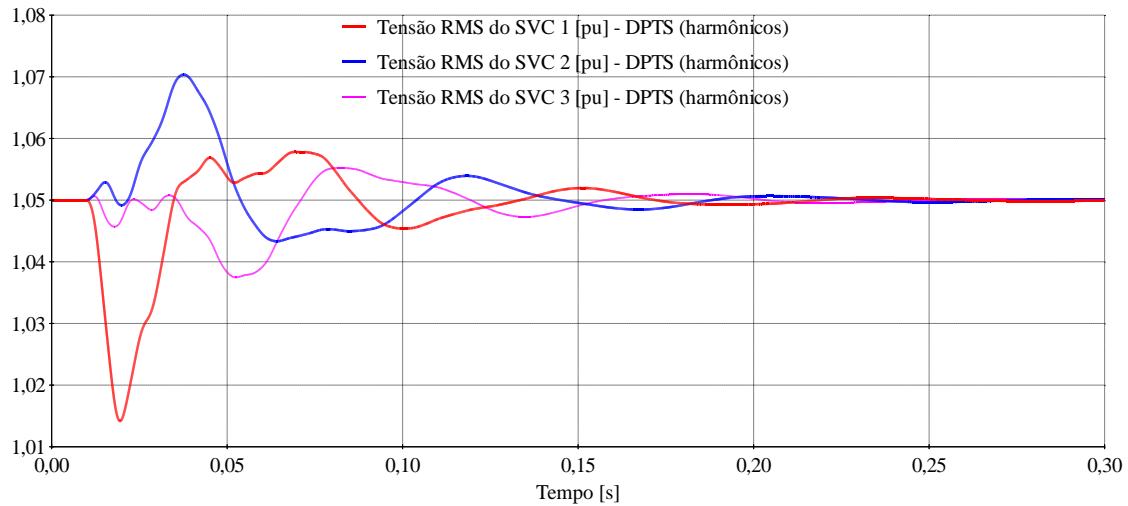


Figura 5.87 – Degrau de +10% em V_{ref} : correntes $i_a(t)$, $i_b(t)$ e $i_c(t)$ do SVC.

Da Figura 5.79 até a Figura 5.87 são apresentados os resultados da simulação do Sistema Teste 3c para o degrau de +10% em V_{ref} . Observa-se que esta perturbação em particular fez com que a susceptância B_n do controle do SVC atingisse seu limite inferior igual a 0,1 pu. O próximo evento simulado é o fechamento da chave 03-04 em $t=10$ ms, de modo a simular um evento desequilibrado de chaveamento de uma carga RL somente na fase “a” da barra de conexão do SVC com a rede trifásica.



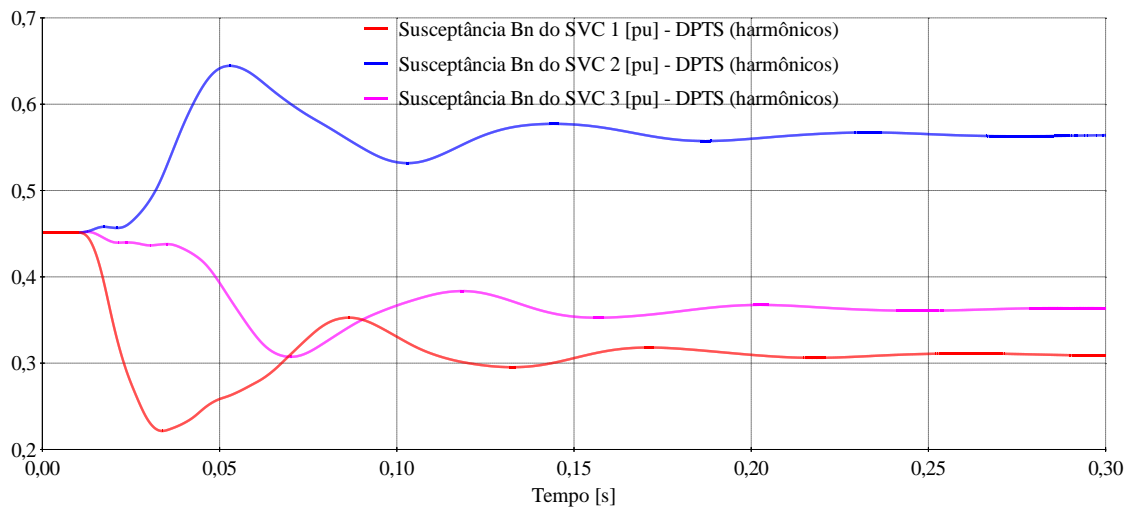


Figura 5.90 – Chaveamento de carga RL na fase “a”: susceptâncias B_n dos SVCs.

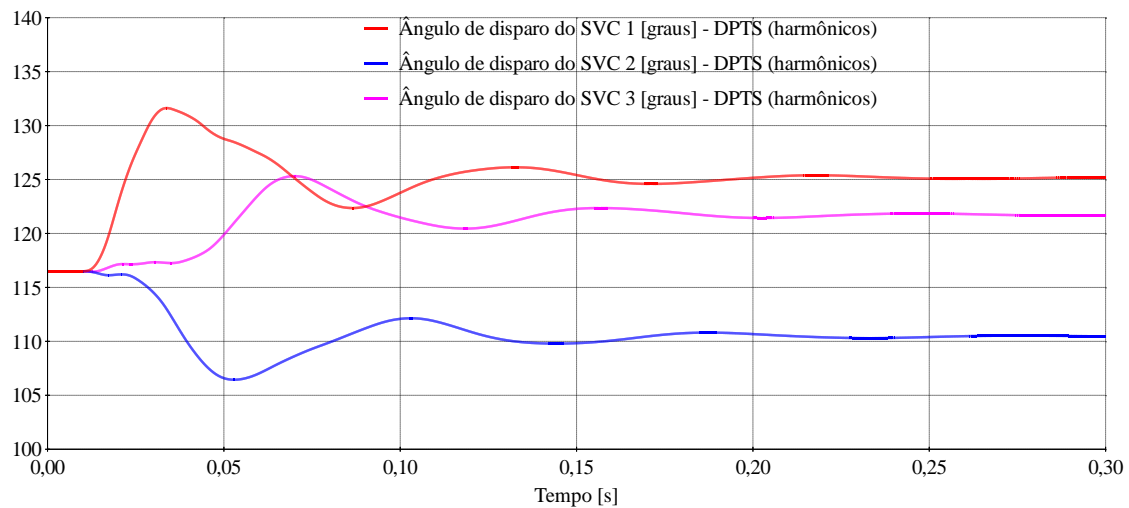


Figura 5.91 – Chaveamento de carga RL na fase “a”: ângulo de disparo dos SVCs.

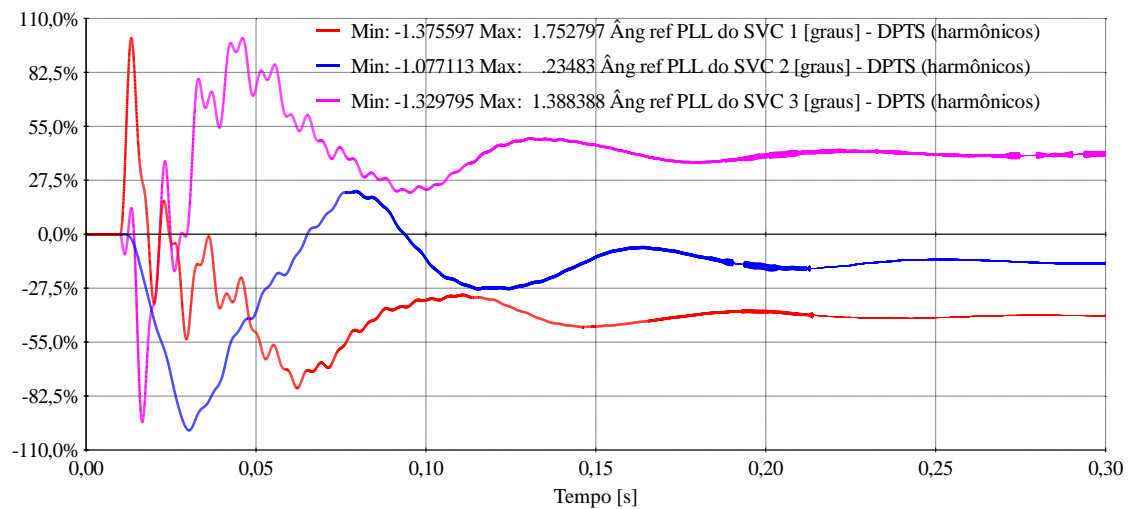


Figura 5.92 – Chaveamento de carga RL na fase “a”: âng. de ref. dos PLLs dos SVCs.

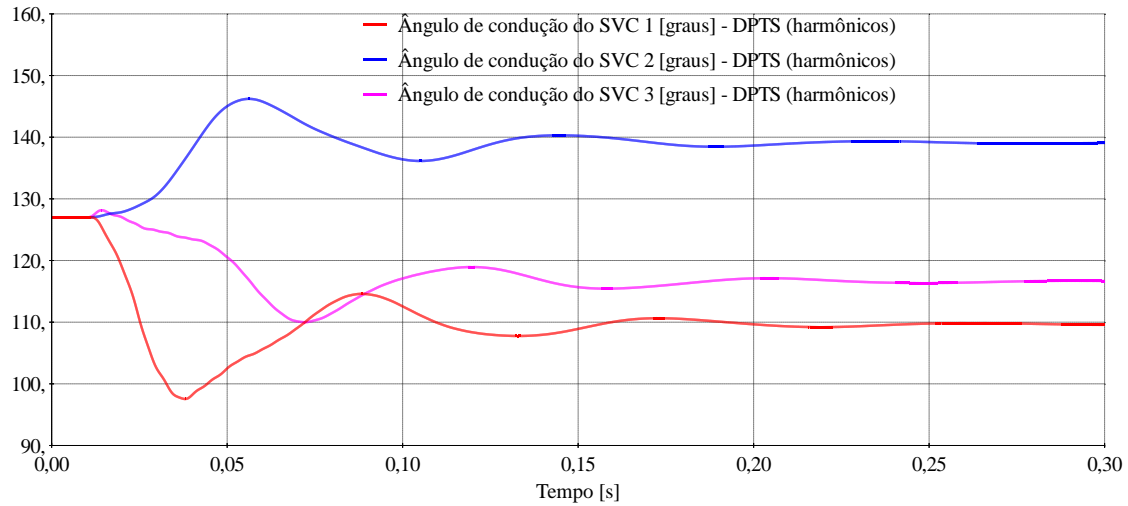


Figura 5.93 – Chaveamento de carga RL na fase “a”: ângulo de condução dos SVCs.

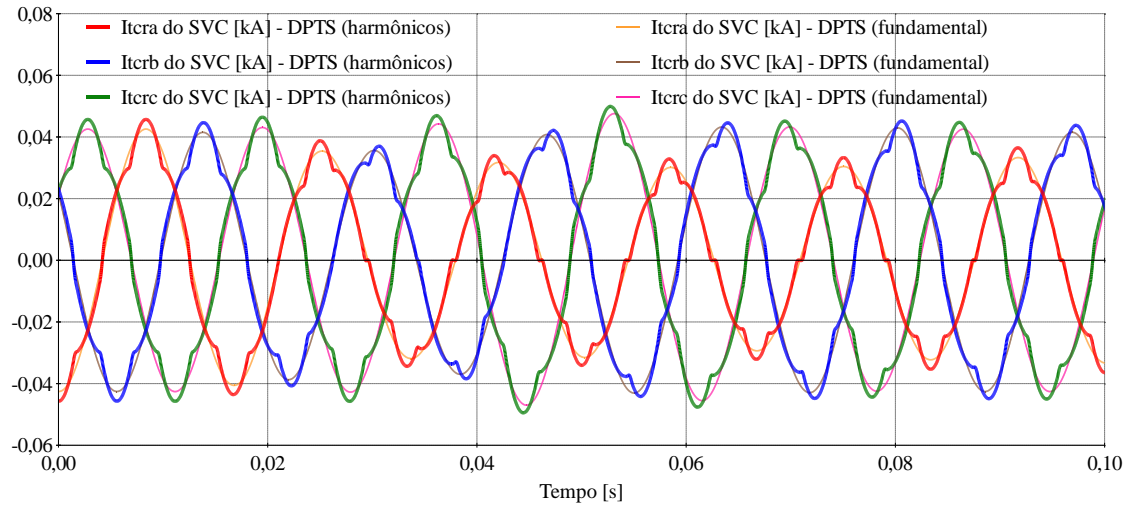


Figura 5.94 – Chaveamento de carga RL na fase “a”: correntes $i_{tcr(a)}(t)$, $i_{tcr(b)}(t)$ e $i_{tcr(c)}(t)$.

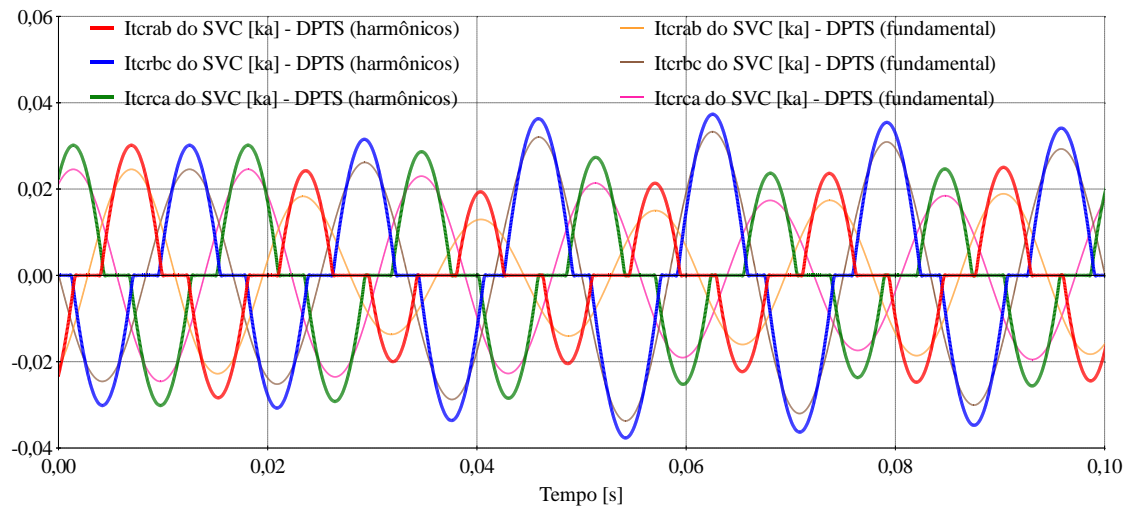


Figura 5.95 – Chaveamento de carga RL na fase “a”: correntes $i_{tcrab}(t)$, $i_{tcrbc}(t)$ e $i_{tcrca}(t)$.

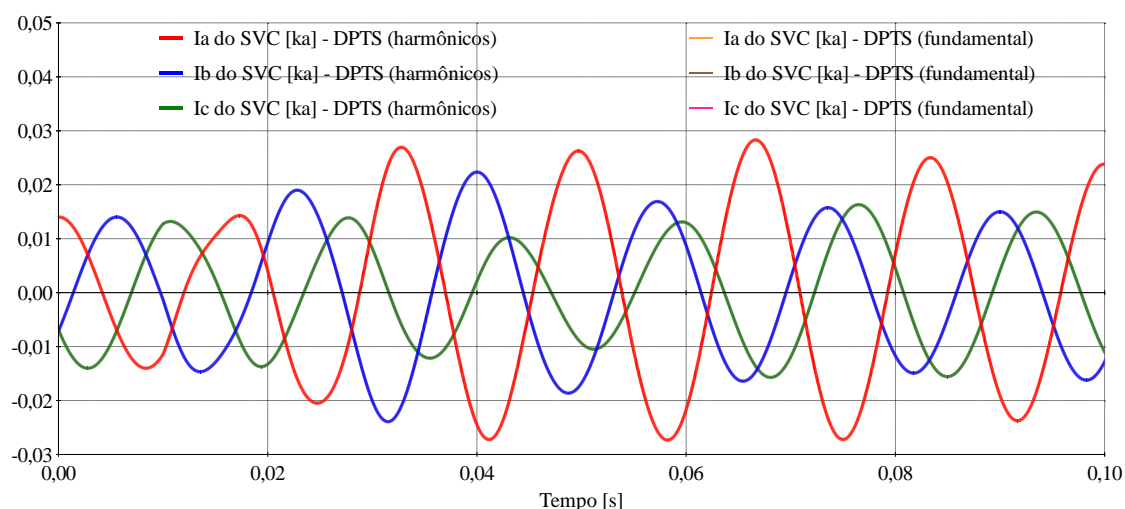


Figura 5.96 – Chaveamento de carga RL na fase “a”: correntes $i_a(t)$, $i_b(t)$ e $i_c(t)$.

Da Figura 5.88 até a Figura 5.96 são apresentados os resultados da simulação do chaveamento na fase “a”. Embora a rede considerada nesta seção seja bastante simples, do ponto de vista teórico não há limitação para a simulação de circuitos trifásicos desbalanceados. Os exemplos de simulação trifásica apresentados validam esta afirmativa mostrando que é viável estender futuramente os modelos do simulador DPTS para abranger análises de fenômenos de natureza desequilibrada.

Capítulo 6

Análise Linear Integrada com DPTS Incluindo SVC

Neste capítulo é apresentada a utilização integrada da análise linear com o DPTS para um sistema contendo um SVC, onde são apresentadas algumas vantagens da metodologia proposta neste trabalho em relação às análises convencionais envolvendo estudos dinâmicos de sistemas contendo equipamentos FACTS.

6.1 Modelagem linearizada da rede contendo SVC

O trabalho [LIRIO 2007a] descreve em detalhes a representação no domínio- s do SVC utilizando fasores dinâmicos em uma modelagem tensorial que considera a interdependência entre as componentes harmônicas do equipamento, produzindo assim modelos analíticos que podem ser aplicados em análises de regime permanente com harmônicos e análise linear para estudos de comportamento dinâmico de redes elétricas.

Nesta modelagem, as equações (A.1)-(A.19) que descrevem o SVC e seu sistema de controle são linearizadas em torno do ponto de operação e escritas em função dos desvios das variáveis através da série de Taylor [ABRAMOWITZ 1972]. Tais equações linearizadas e descritas por fasores dinâmicos, são descritas de forma generalizada no domínio- s por meio de matriz $Y(s)$ [GOMES 2002], modelagem esta que possibilita a correta representação de sistemas infinitos (que possuem um número infinito de polos) como é o caso das linhas de transmissão com parâmetros distribuídos [GOMES 2005a] e a representação de atrasos de transporte. O sistema modelado no domínio- s é:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}(s)\mathbf{x}(s) &= \mathbf{B}(s)\mathbf{u}(s) \\ y(s) &= \mathbf{C}(s)\mathbf{x}(s) + \mathbf{D}(s)\mathbf{u}(s) \end{aligned} \quad (6.1)$$

onde as matrizes \mathbf{Y} , \mathbf{B} , \mathbf{C} e \mathbf{D} possuem elementos que são funções analíticas não-lineares da variável complexa s . No caso particular, onde \mathbf{B} , \mathbf{C} e \mathbf{D} não dependem de s , o sistema (6.1) recai em:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}(s)\mathbf{x}(s) &= \mathbf{B}\mathbf{u}(s) \\ y(s) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(s) + \mathbf{D}\mathbf{u}(s) \end{aligned} \quad (6.2)$$

e no caso particular onde $\mathbf{Y}(s)$ em (6.2) seja função linear de s , o sistema degenera para:

$$\begin{aligned} (s\mathbf{T} - \mathbf{A})\mathbf{x}(s) &= \mathbf{B}\mathbf{u}(s) \\ y(s) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(s) + \mathbf{D}\mathbf{u}(s) \end{aligned} \quad (6.3)$$

que pode ser reescrito como:

$$\begin{aligned} s\mathbf{T}\mathbf{x}(s) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(s) + \mathbf{B}\mathbf{u}(s) \\ y(s) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(s) + \mathbf{D}\mathbf{u}(s) \end{aligned} \quad (6.4)$$

o qual é exatamente a modelagem por sistema descritor. Em [SEMLYEN 1999] a análise de estabilidade de redes contendo elementos não-lineares é realizada utilizando-se a formulação (6.2) para o cálculo de polos. Em [LIRIO 2007a] é realizada uma modelagem tensorial no domínio s utilizando (6.2) para o SVC e para o TCSC considerando-se a interdependência entre as frequências para análise dinâmica de pequenas perturbações, a qual é utilizada neste trabalho para a realização de análise linear do SVC de maneira integrada com o DPTS. De modo a simplificar a escrita do texto, chamaremos daqui em diante esta técnica de modelagem linearizada do SVC baseada em FD para análise linear de DPLM (*Dynamic Phasors Linear Modelling*). A Figura 6.1 ilustra como os métodos DPTS e DPLM possuem uma mesma origem na formulação matemática, pois ambos são derivados das equações em termos de funções de chaveamento, as quais são descritas pela série de Fourier e modeladas de forma tensorial utilizando-se fasores dinâmicos.

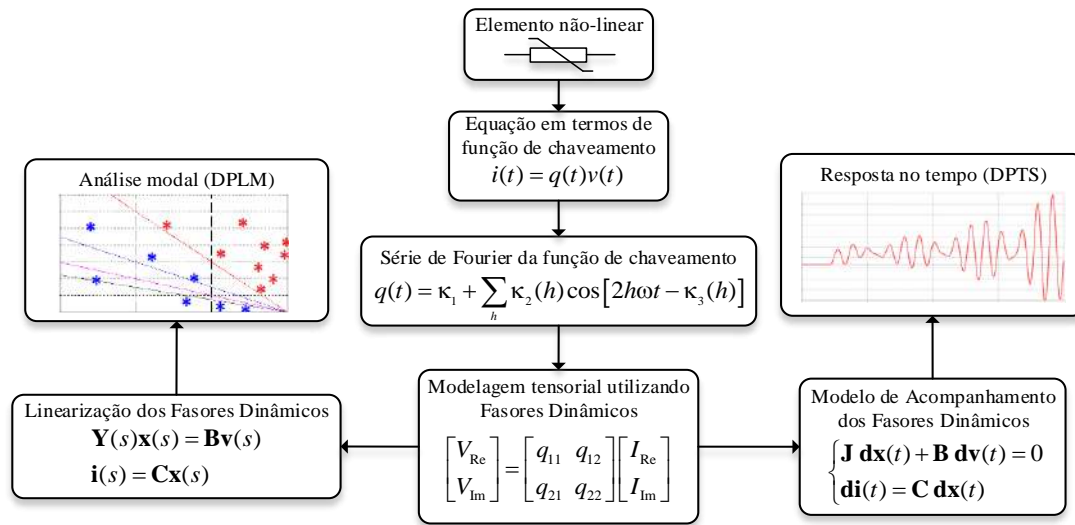


Figura 6.1 – Origem estrutural matemática dos métodos DPTS e DPLM.

6.2 Análise linear de Sistema Teste de 4 barras contendo um SVC

Seja o Sistema Teste 2c mostrado na Figura 6.2, o qual contém uma linha de transmissão de 300 km de comprimento e um SVC conectado próximo da carga. Maiores detalhes deste sistema são apresentados na Tabela B.5 do Apêndice B.

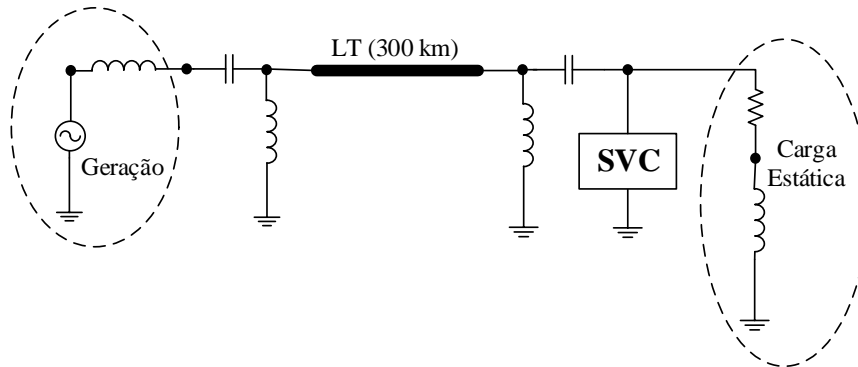


Figura 6.2 – Sistema Teste 2c.

Na Figura 6.3 é mostrado o diagrama de fluxo de potência do Sistema Teste 2c, o qual exhibe o ponto de operação (regime permanente) considerado nesta análise.

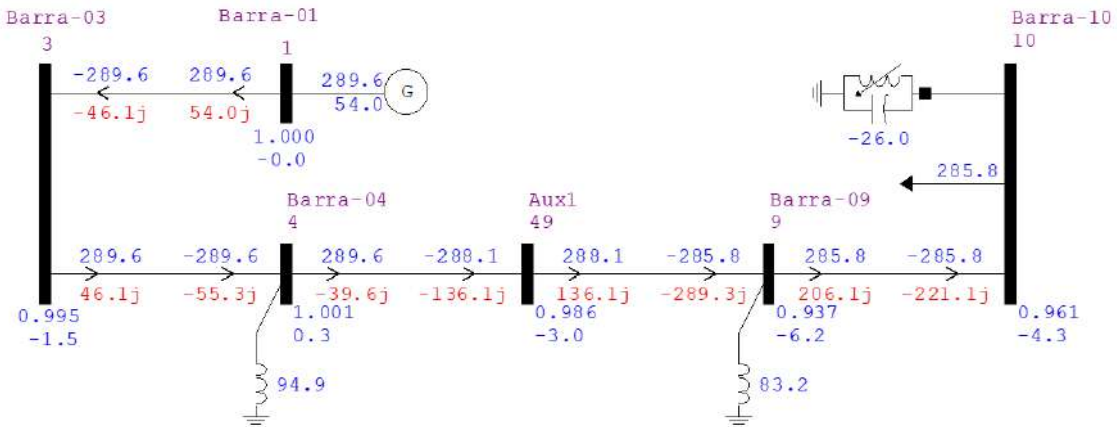


Figura 6.3 – Ponto de operação (regime permanente) do Sistema Teste 2c.

Para realizar uma simulação de transitório eletromecânico [STOTT 1979], [KUNDUR 1994], [KUNDUR 2003] deste sistema, foi utilizado o Programa de estabilidade ANATEM [CEPEL 2017] e a malha que modela o controle de tensão do SVC é mostrada na Figura 6.4. $K_{P-PI}=80$; $K_{I-PI}=1000$; $T=0.003$ s; Potência nominal do SVC = $-115,1/+282,7$ Mvar ($L_{TCR}=5$ H em conexão Δ).

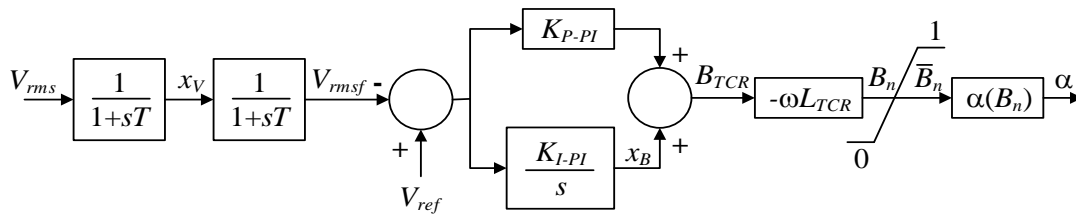


Figura 6.4 – Malha de controle de tensão do SVC implementada no ANATEM.

A Figura 6.5 mostra o resultado da simulação de um degrau de 0,1% na tensão de referência (V_{ref}) do controle de tensão do SVC. Observa-se que a resposta ao degrau no ANATEM tem comportamento estável e, após o distúrbio, o SVC controlou a tensão para o valor especificado. Contudo, em simulações de transitórios eletromecânicos como a realizada, a relação entre fasores da rede elétrica é feita de forma algébrica, sem considerar termos diferenciais, por impedâncias constantes calculadas na frequência nominal (60 Hz) e a linha de transmissão é representada por um modelo π a parâmetros concentrados [KUNDUR 1994].

Neste tipo de modelagem não é possível identificar fenômenos associados à possíveis interações do controle do SVC com a rede. É necessário para tal estudo, partir para

simulações que levam em consideração a dinâmica da rede, como é o caso dos modelos contidos nos programas convencionais de transitórios eletromagnéticos [DOMMEL 1969]. Para exemplificar esta situação, o Sistema Teste 2c foi simulado também no programa PSCAD/EMTCD para o mesmo degrau de 0,1% na tensão de referência do controle de tensão do SVC.

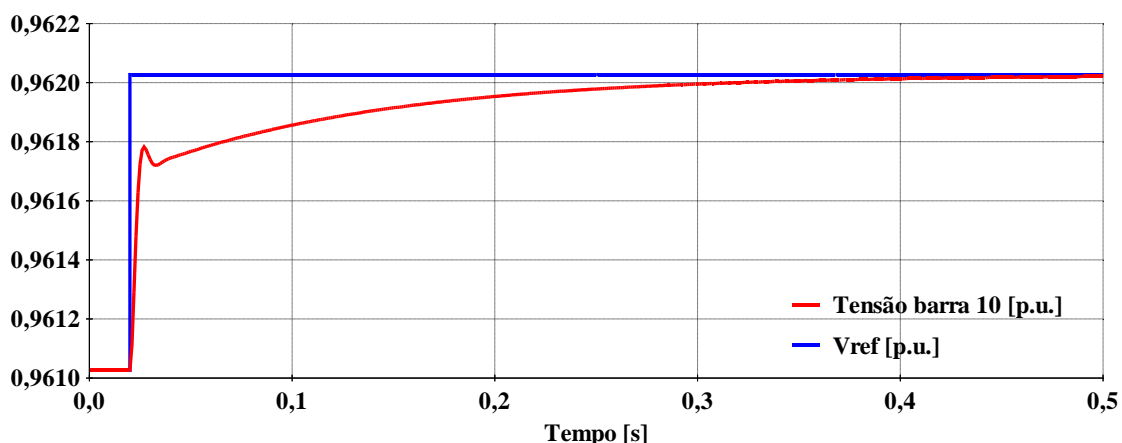


Figura 6.5 – Simulação no ANATEM de resposta a um degrau de 0,1% em Vref.

Da Figura 6.6 até a Figura 6.8 são apresentadas respectivamente a modelagem da rede, SVC e sistema de controle e disparo dos tiristores no PSCAD/EMTDC.

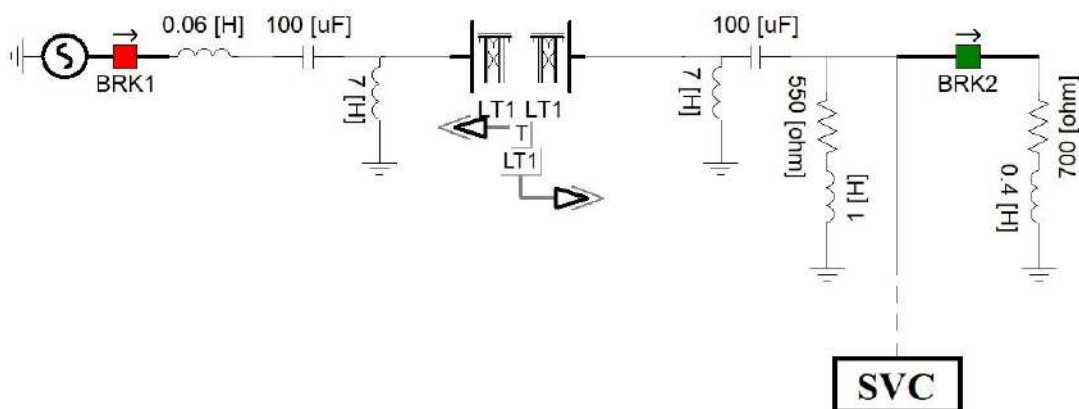


Figura 6.6 – Sistema Teste 2c no PSCAD (rede).

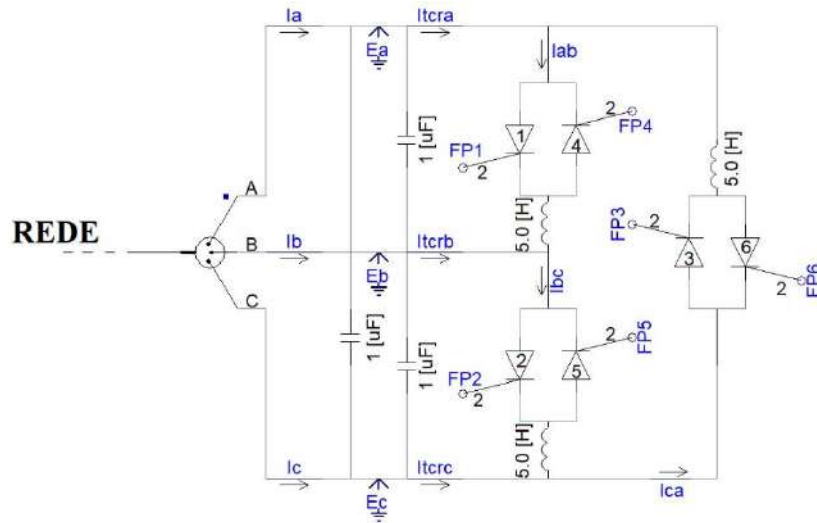


Figura 6.7 – Sistema Teste 2c no PSCAD (SVC).

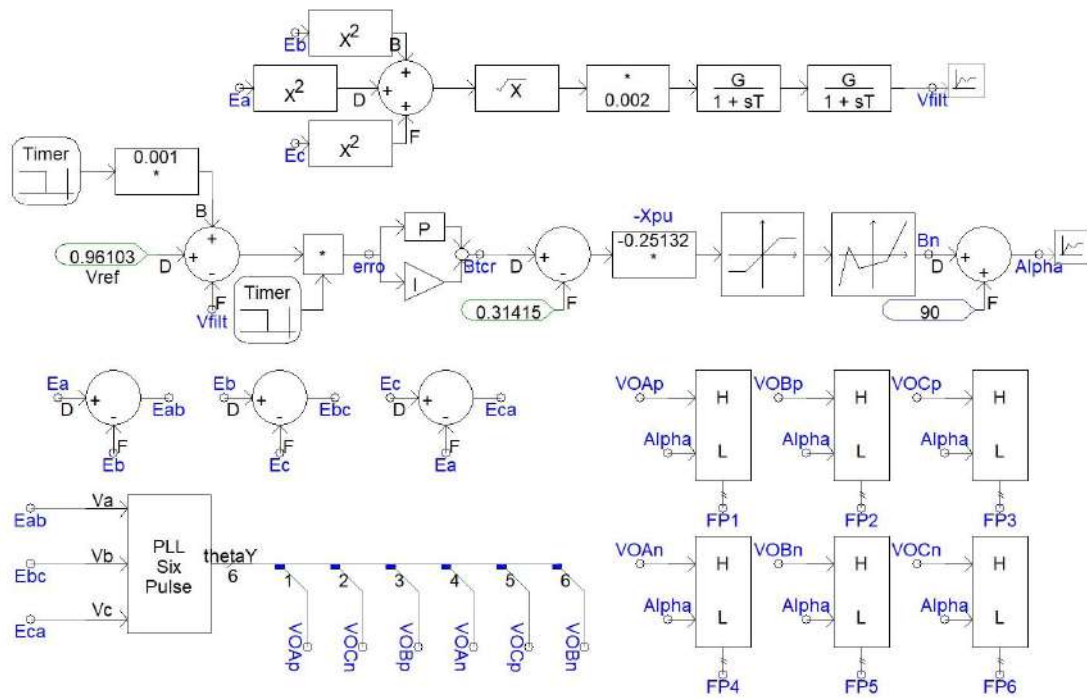


Figura 6.8 – Sistema Teste 2c no PSCAD (controle).

Quando se simula redes elétricas em programas como o PSCAD/EMTDC, é usual a criação de um arquivo conhecido como *snapshot* [MANITOBA 2016], o qual é criado simulando-se o sistema por um determinado período para que o mesmo entre em regime permanente, uma vez que neste programa todas as variáveis são inicializadas por padrão

com valor nulo no início de cada simulação. Uma vez criado o *snapshot*, as simulações posteriores são realizadas partindo-se deste ponto de operação inicial, havendo a necessidade de se criar outro *snapshot* somente se algum parâmetro da rede, equipamentos ou controle for alterado, conforme explicações da Seção 5.1.

Na Figura 6.9 é apresentada uma curva de simulação no PSCAD objetivando-se a criação de um arquivo *snapshot* para o Sistema Teste 2c. Contudo, verifica-se que a tensão terminal do SVC não atinge um valor de regime permanente, já que o sistema apresenta característica oscilatória. Neste caso, a inicialização será possível apenas se os ganhos do controle de tensão do SVC forem reajustados para um valor adequado que torne o sistema estável e amortecido. Mas em alguns casos pode-se estar simulando a rede elétrica justamente para efetuar o ajuste do sistema de controle ou verificar o surgimento de alguma interação dinâmica adversa entre a rede e o equipamento FACTS.

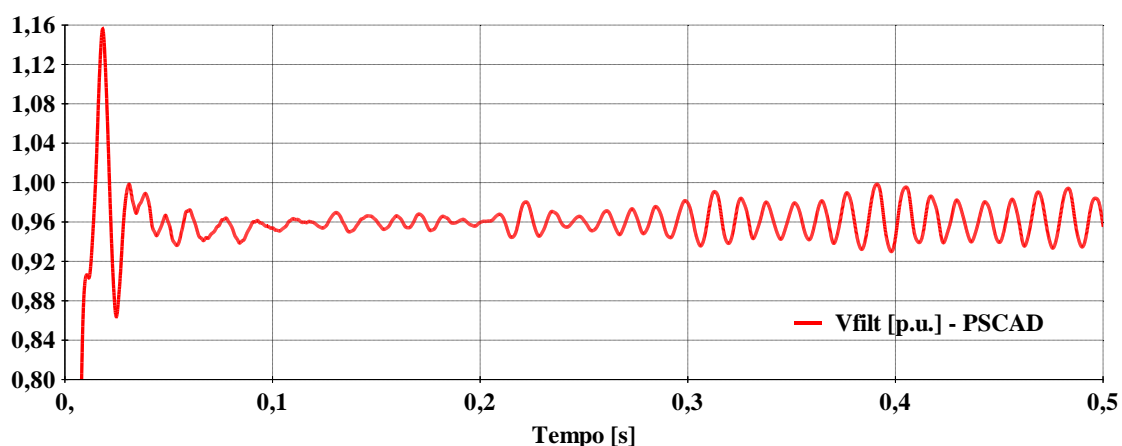


Figura 6.9 – Tentativa de criação de *snapshot* no PSCAD para Sistema Teste 2c.

Este fato revela uma deficiência de tais ferramentas para o tipo de análise em questão. E o problema é agravado com o aumento das dimensões da rede, aumento do número de equipamentos FACTS presente e com a complexidade dos sistemas de controle associados. Uma forma possível de ajuste de controladores no domínio do tempo seria por um processo de tentativa e erro onde os parâmetros são variados sistematicamente até que os resultados sejam satisfatórios. Contudo este processo é bastante moroso, depende bastante da experiência de ajuste do analista e, no caso de uma grande quantidade de

parâmetros e alto grau de interação entre os equipamentos, como o caso citado, este tipo de método de ajuste pode ser até inviável.

De modo a investigar de maneira mais profunda a dinâmica deste sistema realiza-se então uma análise linear ao redor do ponto de operação (Figura 6.3), utilizando a modelagem por matriz $\mathbf{Y}(s)$ linearizada do SVC [LIRIO 2007a]. A modelagem DPLM possibilita a correta representação de sistemas infinitos (que possuem um número infinito de polos) como é o caso das linhas de transmissão com parâmetros distribuídos [GOMES 2005a] e a representação de atrasos de transporte. O modelo do PLL utilizado é mostrado na Figura 6.10, onde $K_{I-PLL}=500$; $K_{P-PLL}=50$.

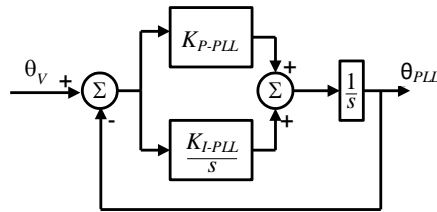


Figura 6.10 – Modelo de PLL utilizado na modelagem DPLM.

Utilizando o método SDPA (*Sequential Dominant Pole Algorithm*) de [GOMES 2002] para algumas tentativas sucessivas de convergência partindo-se de conjuntos pré-definidos de polos arbitrários, obtém-se com relativa facilidade os polos dominantes do Sistema Teste 2c linearizado, mostrado na Figura 6.11, Figura 6.12 e na Tabela 6.1. As retas em vermelho, azul, rosa e preto representam, respectivamente, as retas de fator de amortecimento constante de 5%, 10%, 15 % e 20%.

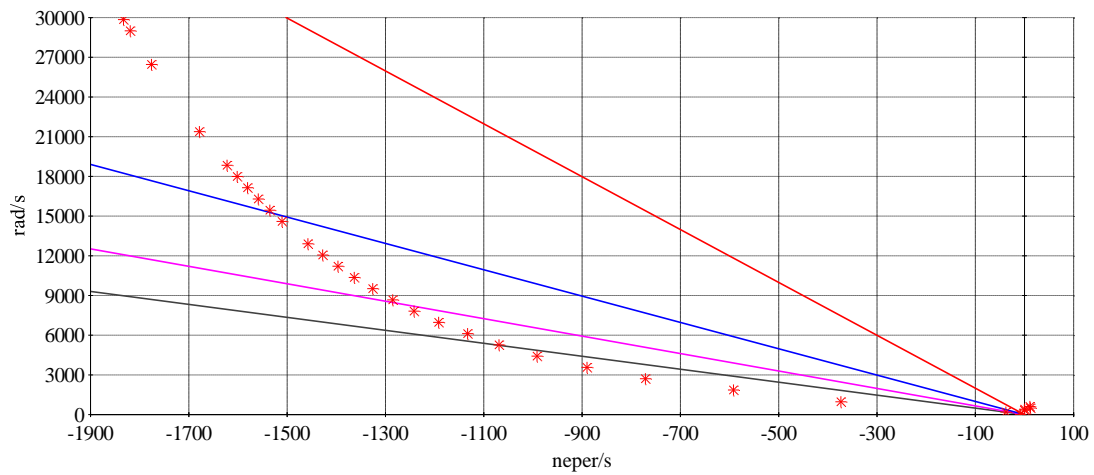


Figura 6.11 – Polos dominantes do Sistema Teste 2c linearizado.

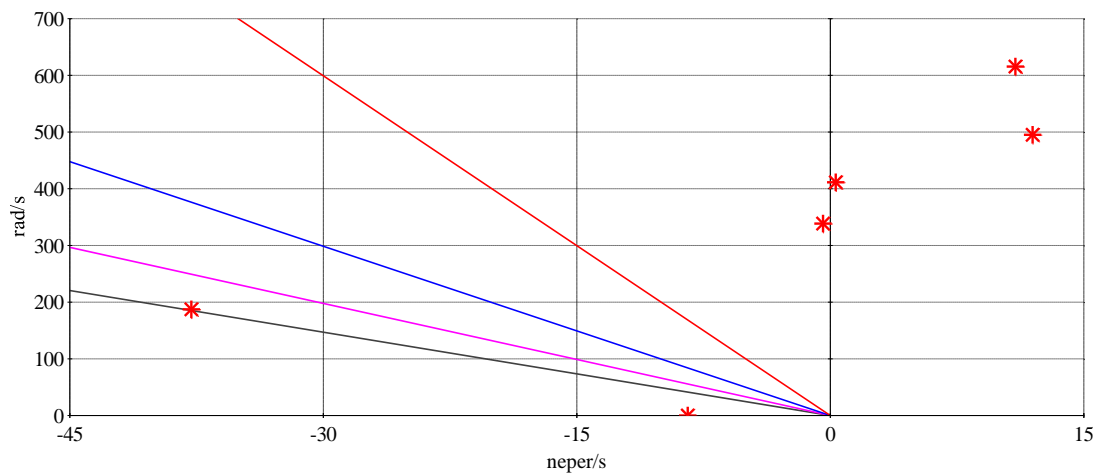


Figura 6.12 – Gráfico ampliado próximo aos polos instáveis do Sistema Teste 2c.

Tabela 6.1 – Lista de polos dominantes do Sistema Teste 2c linearizado.

REAL [neper/s]	IMAG [rad/s]	AMORT. [%]	FREQ. [Hz]	REAL [neper/s]	IMAG [rad/s]	AMORT. [%]	FREQ. [Hz]
11,970	495,244	-2,42%	78,8	-1363,666	10362,847	13,05%	1649,3
10,953	615,492	-1,78%	98,0	-1326,024	9515,543	13,80%	1514,5
0,322	411,429	-0,08%	65,5	-1285,345	8666,017	14,67%	1379,2
-0,429	338,597	0,13%	53,9	-1242,014	7817,418	15,69%	1244,2
-1846,617	30696,025	6,00%	4885,4	-1191,899	6970,434	16,85%	1109,4
-1833,041	29849,283	6,13%	4750,7	-1133,050	6119,748	18,21%	974,0
-1819,384	29002,490	6,26%	4615,9	-37,814	187,285	19,79%	29,8
-1776,111	26462,199	6,70%	4211,6	-1069,142	5268,717	19,89%	838,5
-1678,632	21380,634	7,83%	3402,8	-991,841	4420,537	21,89%	703,6
-1622,432	18839,043	8,58%	2998,3	-890,036	3565,059	24,22%	567,4
-1601,756	17991,672	8,87%	2863,5	-771,231	2708,636	27,38%	431,1

-1580,733	17143,967	9,18%	2728,6	-592,034	1858,755	30,35%	295,8
-1558,913	16296,750	9,52%	2593,7	-373,475	968,667	35,97%	154,2
-1535,313	15449,632	9,89%	2458,9	-20639,596	16460,115	78,18%	2619,7
-1457,858	12906,793	11,22%	2054,2	-22463,665	2088,689	99,57%	332,4
-1427,799	12058,910	11,76%	1919,2	-24660,173	50,063	100,00%	8,0
-1396,784	11210,351	12,36%	1784,2	-8,437	0,000	100,00%	0,0

Este conjunto de polos compõem um modelo de ordem reduzida (MOR) que, para a função de transferência $V_{ref}(s)/V_{rmsf}(s)$, nos fornece uma resposta em frequência muito próxima da resposta do sistema completo (com infinitos polos), conforme mostrado na Figura 6.13.

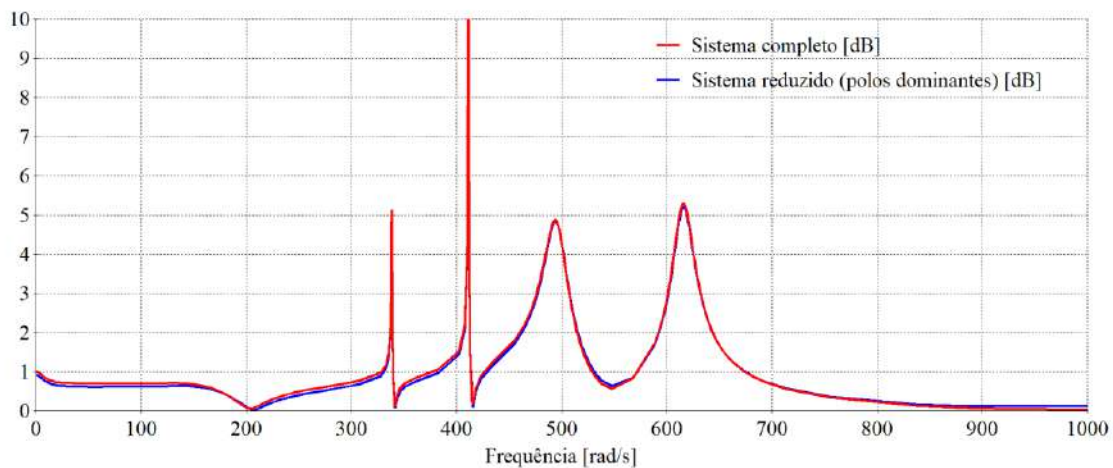


Figura 6.13 – Resposta em frequência do Sistema Teste 2c linearizado.

Uma vez obtidos os polos dominantes do sistema, pode-se traçar a resposta no tempo do Sistema Teste 2c linearizado a partir do MOR para um degrau de 0,1% em V_{ref} , conforme mostra a Figura 6.14.

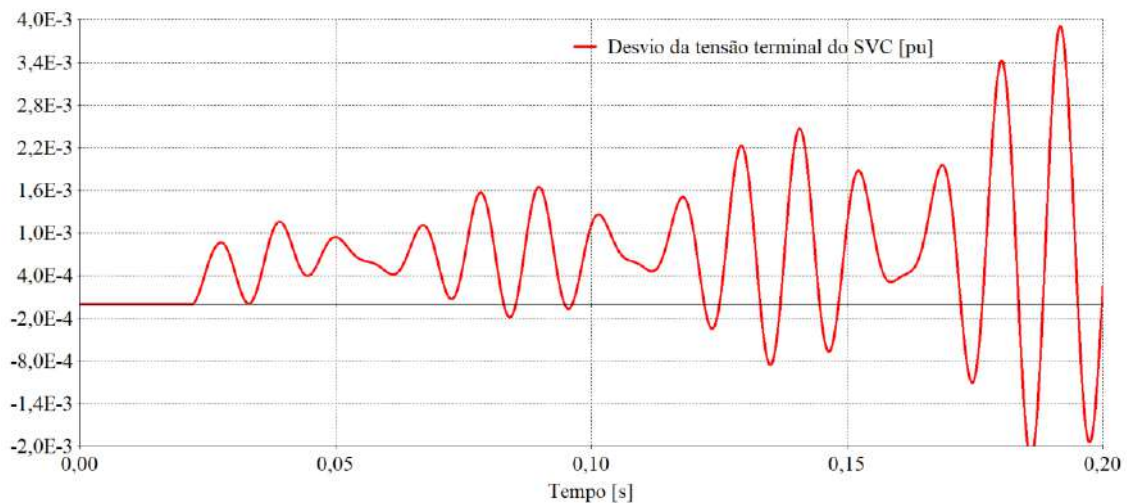


Figura 6.14 – Desvio da tensão do SVC para degrau de 0,1% em V_{ref} (Sistema Teste 2c linearizado).

Comparando-se a Figura 6.14 com a Figura 6.5 vemos que a modelagem convencional de transitórios eletromecânicos não contemplou neste caso as interações entre o SVC e a rede (Figura 6.15).

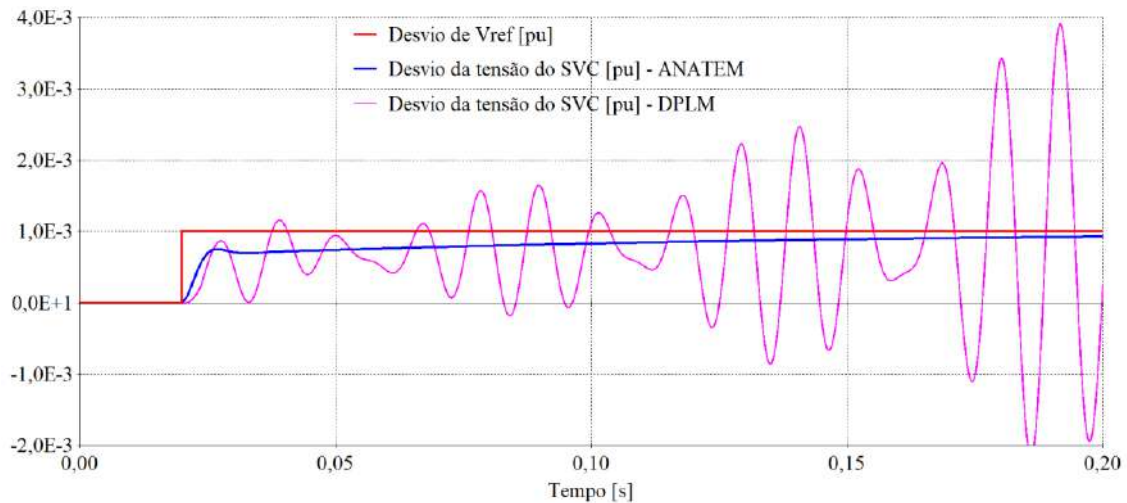


Figura 6.15 – Comparação das respostas do ANATEM e do DPLM para o Sistema Teste 2c.

A partir do sistema reduzido também é possível a realização de uma análise linear pelo método do lugar-das-raízes [OGATA 1990] com o método SDPA [GOMES 2002] variando-se o ganho proporcional K_{P-PI} (Figura 6.4) do controle do SVC do valor 80 até o valor 0, conforme mostrado na Figura 6.16 (as setas indicam as direções decrescentes

do ganho). Esta análise tem por objetivo encontrar um valor para o ganho proporcional que estabilize o sistema e proporcione uma resposta dinâmica adequada para o mesmo.

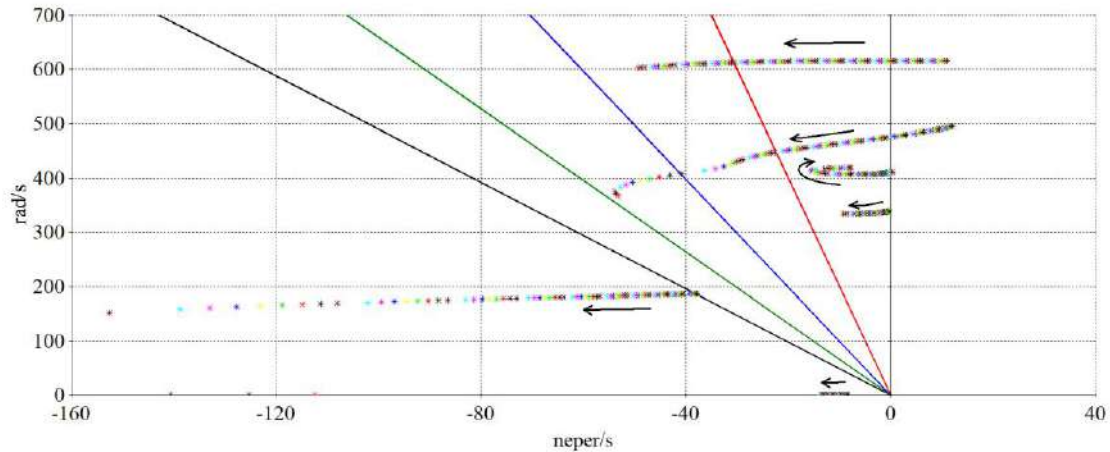


Figura 6.16 – Lugar-das-raízes variando-se o ganho K_{P-PI} no Sistema Teste 2c.

Observando-se o diagrama do lugar-das-raízes, escolheu-se o valor do ganho proporcional K_{P-PI} igual a 1, para o qual os polos dominantes passam a ser os apresentados na Tabela 6.2. Observando esta tabela, vemos que os polos são estáveis.

Tabela 6.2 – Lista de polos dominantes do Sistema Teste 2c com $K_{P-PI}=1$.

REAL [neper/s]	IMAG [rad/s]	AMORT. [%]	FREQ. [Hz]
-8,158	419,1121	1,95%	66,7
-8,6852	334,6074	2,59%	53,3
-53,8141	1359,831	3,95%	216,4
-48,4993	603,6751	8,01%	96,1
-1541,38	15405,53	9,96%	2451,9
-1408,22	11153,3	12,53%	1775,1
-1376,37	10302,25	13,24%	1639,7
-53,7861	372,3496	14,30%	59,3
-948,065	3419,33	26,72%	544,2
-847,414	2538,336	31,67%	404,0
-669,301	1600,783	38,57%	254,8
-330,532	426,9479	61,22%	68,0
-677,185	518,8202	79,38%	82,6
-9540,36	1395,798	98,95%	222,2
-35,7795	2,8031	99,69%	0,5
-13,681	0	100,00%	0,0
-128,802	0	100,00%	0,0
-522,999	0	100,00%	0,0
-38668,9	160,9473	100,00%	25,6

Os polos dominantes da Tabela 6.2 compõem o modelo de ordem reduzida. Na Figura 6.17 é mostrada a resposta em frequência para o sistema linearizado completo e para o sistema linearizado reduzido ($K_{P-PI}=1$), onde observa-se que ambos são praticamente coincidentes.

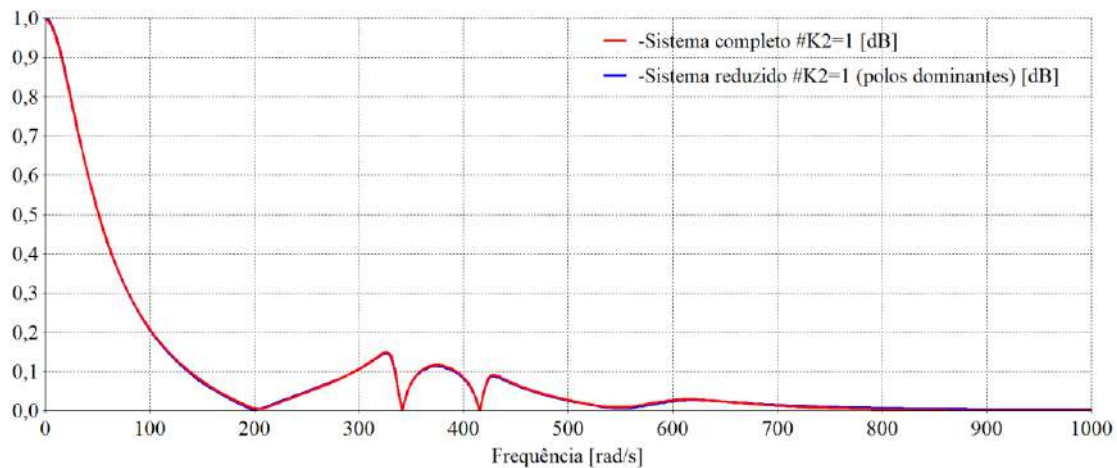


Figura 6.17 – Resposta em frequência do sistema reduzido com $K_{P-PI}=1$.

A partir do modelo de ordem reduzida do Sistema Teste 2c ($K_{P-PI}=1$) traça-se a resposta no tempo para um degrau de 0,1% em V_{ref} , conforme mostrado na Figura 6.18.

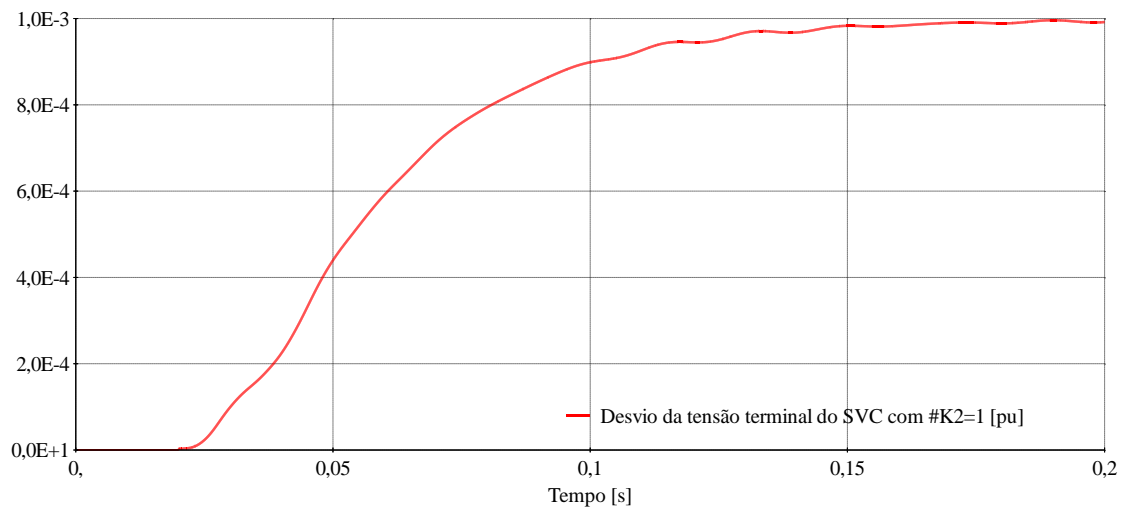


Figura 6.18 – Desvio da tensão do SVC (com $K_{P-PI}=1$) para degrau de 0,1% em V_{ref} .

Uma vez verificada a efetividade do novo ganho proporcional K_{P-PI} ajustado, pode-se verificar o desempenho do sistema em simulação não-linear utilizando-se o DPTS. A Figura 6.19 mostra o Sistema Teste 2c modelado no DPTS (MATLAB) e a Tabela B.5 do Apêndice B apresenta os dados do arquivo de entrada deste sistema.

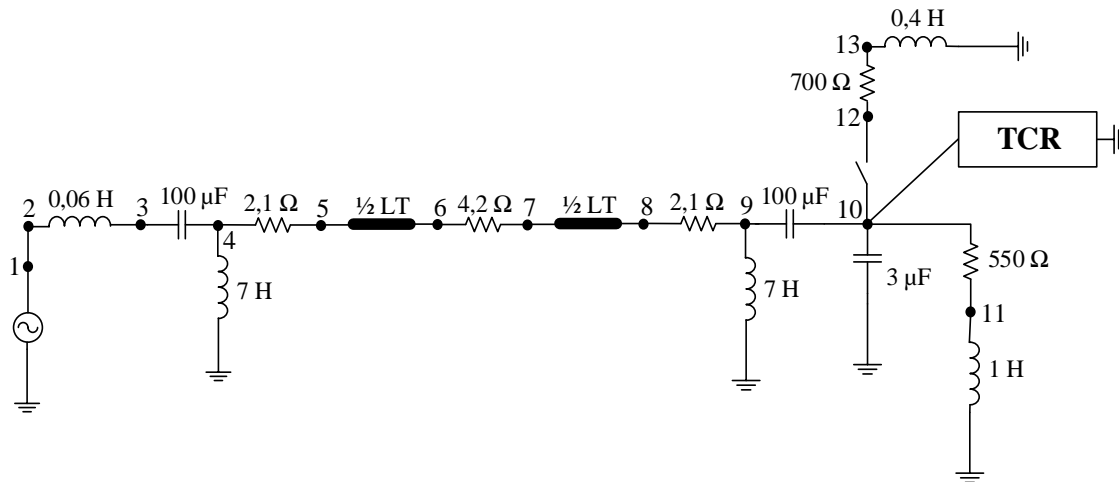


Figura 6.19 – Sistema Teste 2c no DPTS.

Simulando-se o fechamento da chave 10-12 em $t=20$ ms no DPTS e comparando com a mesma simulação no PSCAD, tem-se a Figura 6.20 e a Figura 6.21. A criação do arquivo *snapshot* no PSCAD tornou-se possível com o novo ganho proporcional $K_{P-PI}=1$, uma vez que o sistema agora tem comportamento estável.

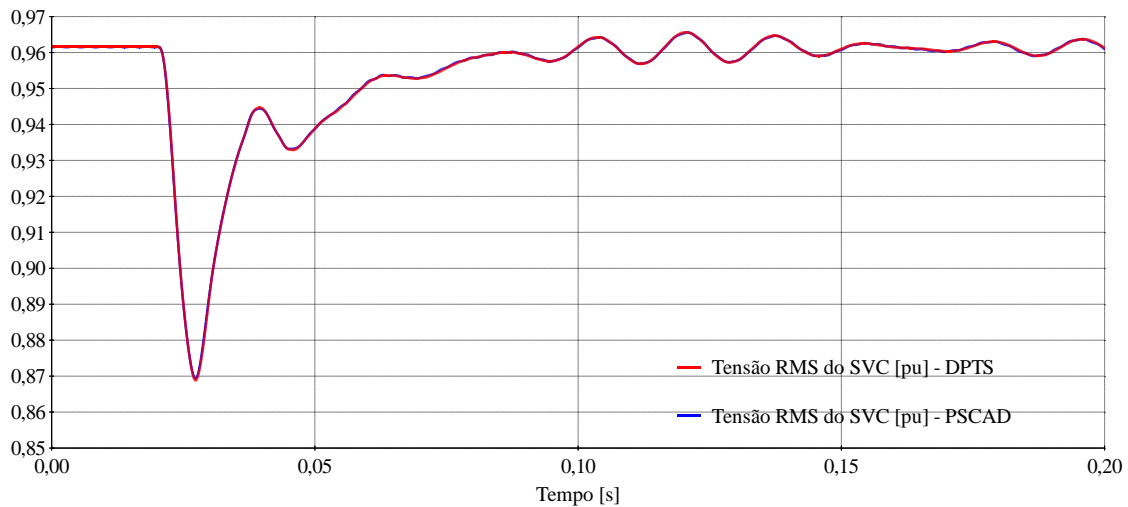


Figura 6.20 – Comparação entre DPTS e PSCAD para chaveamento de carga – Tensão do SVC.

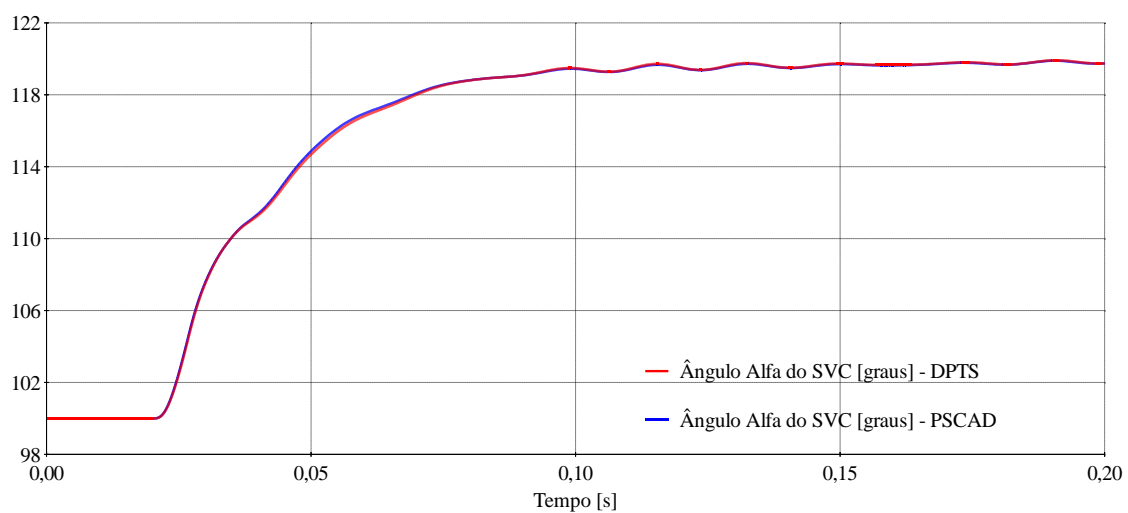


Figura 6.21 – Comparação entre DPTS e PSCAD para chaveamento de carga – Ângulo Alfa do SVC.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

7.1 Conclusões

Este trabalho apresentou o desenvolvimento seminal de um simulador de transitórios eletromagnéticos baseado em fasores dinâmicos (FD) voltado para a simulação de sistemas de potência contendo equipamentos chaveados como os controladores FACTS e elos HVDC.

O algoritmo proposto para a simulação não-linear no domínio do tempo mostrou-se eficaz e forneceu resultados visualmente coincidentes com um programa EMT convencional (PSCAD/EMTDC).

Modelos com fasores dinâmicos de frequência fundamental mostraram-se bastante adequados em diversas simulações, mas também ficou evidenciado que a consideração dos FDs das componentes harmônicas tanto no equipamento como na rede possibilita a obtenção das formas de onda com muito boa precisão, inclusive na representação das distorções reais, e uma melhor precisão nos resultados de forma geral. Nas simulações de redes elétricas contendo somente elementos lineares, os fasores harmônicos são completamente desnecessários. Ressalta-se também o caráter analítico dos modelos baseados em funções de chaveamento.

Foi apresentada uma forma eficiente de considerar os harmônicos na rede, utilizando o método Quase-Newton, aproveitando o desacoplamento em frequência que existe nos elementos lineares e, ao mesmo tempo, integrando de forma precisa o acoplamento em frequência dos elementos não lineares (SVC).

O trabalho também mostra um caso prático de uso integrado com análise linear, onde os resultados para pequenas perturbações e para o DPTS também são equivalentes. Nessa análise, a deficiência de simulações convencionais de EMT ao lidar com casos instáveis

ou mal amortecidos foi evidenciada pela impossibilidade de criar um *snapshot* estável para iniciar simulações.

Por outro lado, o DPTS proposto simula casos estáveis ou instáveis com um procedimento de inicialização automática e os mesmos dados podem ser compartilhados para análises lineares e não lineares. Resultados em um programa convencional de estabilidade transitória também foram apresentados. Neste caso, a simulação não pôde mostrar a instabilidade na faixa de alta frequência onde os modelos e a ausência de transitórios eletromagnéticos na rede inviabilizam esse tipo de análise. No exemplo, modelos de ordem reduzida foram usados para obter respostas no tempo linearizadas. O procedimento de obter todo o conjunto de polos dominantes é manual e exige algum esforço. Por outro lado, o método DPTS proposto é direto, baseado apenas na integração numérica, e nenhuma análise adicional é necessária.

Portanto, o método proposto substitui este procedimento e permite concentrar a análise linear apenas nos polos críticos. A combinação de ambos os métodos forma uma ferramenta abrangente para o desempenho dinâmico de redes elétricas com dispositivos eletrônicos de potência.

7.2 Trabalhos Futuros

O algoritmo do simulador proposto neste trabalho permite uma série de aplicações e traz uma série de facilidades em estudos avançados e complexos. Para viabilizar estas aplicações, os seguintes trabalhos futuros são vislumbrados como continuação desta tese:

- Implementação do DPTS em uma linguagem de programação mais eficiente (como Fortran ou C) e paralelização das rotinas do método de solução alternado com MLA de modo a reduzir significativamente o tempo total de simulação e permitir uma comparação de tempos de simulação justa entre DPTS e PSCAD;
- Implementação de passo variável no método de integração numérica presente no DPTS com o objetivo de tornar a simulação mais eficiente sem perda de precisão;

- Inclusão no DPTS de modelos de fasores dinâmicos de máquinas síncronas (polos salientes e rotor liso) com o objetivo de desenvolver estudos considerando os transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos;
- Implementação computacional de modelos trifásicos de fasores dinâmicos para outros equipamentos FACTS e para sistemas HVDC, permitindo inclusive estudos de interação dinâmica mesmo em sistemas com desbalanços;

Referências Bibliográficas

- [ABRAMOWITZ 1972] ABRAMOWITZ, M., Stegun, I.A., “Handbook of Mathematical Functions, with Formulas, Graphs and Mathematical Tables”, National Bureau of Standards, Applied Mathematics Series 55, Washington, DC, EUA, 1972.
- [ACHA 2004] ACHA, E., Esquivel, C.R.F., Perez, H.A., Camacho, C.A., “FACTS Modelling and Simulation in Power Networks”, John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [ALVES 1999] ALVES, J.E.R., “Modelagem de Reatores Controlados por Tiristores Baseada em Funções de Chaveamento Generalizadas”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 1999.
- [ALVES 2008] ALVES, J.E.R., Pilotto, L.A.S., Watanabe, E.H., “Thyristor-Controlled Reactors Nonlinear and Linear Dynamic Analytical Models”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 1, January 2008, Pages 338 - 346.
- [ARAÚJO 2005] ARAÚJO, A.E.A., Neves, W.L.A., “Cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia”, Editora UFMG, 1ª edição, 2005.
- [ARRILLAGA 1997] ARRILLAGA, J., Smith, B.C., Watson, N.R., Wood, A.R., “Power System Harmonic Analysis”, John Wiley & Sons, 1997.
- [ARRILLAGA 2003] ARRILLAGA, J., Watson, N.R., “Power System Harmonics”, John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [BERGERON 1950] BERGERON, L., “Du coup de bélier en hydraulique au coup de foudre en électricité”, Dunod éditeur, Paris, 1950.
- [BORRÉ 2011] BORRÉ, A.C., Ortiz, A., Watanabe, E.H., Sulkowski, W., “Synchronous generator power oscillations damped by using TCSC or SSSC working as a variable reactance”, International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Aug 2011, Beijing, China.
- [BOYCE 2009] BOYCE, W.E., DiPrima, R.C., "Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems", Ninth Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2009.

- [CAVALIERE 2002] CAVALIERE, C.A.C., Watanabe, E.H., Aredes, M., “Multi-pulse STATCOM operation under unbalanced voltages”, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Jan 2002, New York, NY, USA.
- [CEPEL 2017] CEPEL, "Análise de Transitórios Eletromecânicos - ANATEM - V11.02.00 - Manual do Usuário", 2017.
- [CLOSE 1975] CLOSE, C.M., “Circuitos Lineares”, 2 edição, LTC S.A., 1975.
- [CUNDY 1989] CUNDY, H.M., Rollett, A.R., "Mathematical Models", 3rd ed. Stradbroke, England: Tarquin Pub., pp. 242-244, 1989.
- [DANIEL 2010] DANIEL, L.O., Ping, W.W., Rangel, R.D., Carvalho, A.R., Almeida, L.P., “Aplicação de Conversores VSC a Sistemas de Transmissão de Energia”, Revista Eletricidade Moderna, Abril 2010.
- [DANIEL 2011] DANIEL, L.O., “Modelagem, Análise e Controle de um Elo de Tensão Contínua com Conversores VSC Conectados em Back-to-back”, dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.
- [DANIEL 2012] DANIEL, L.O., Lirio, F.L., Watanabe, E.H., "Modelagem Linear de um Elo de Corrente Contínua Back-to-back com Conversores VSC", XII SEPOPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, maio 2012.
- [DANIEL 2013] DANIEL, L.O., Gomes Jr, S., Grander, L.O., Lirio, F.L., “Small Signal Analysis of HVDC Systems Using Computational Program PacDyn”, Colloquium Cigré CE-B4 - HVDC and Power Electronics to Boost Network Performance, Brasilia, DF, Brazil, October 2013.
- [DANIEL 2017a] DANIEL, L.O., Gomes Jr, S., Watanabe, E.H., “Utilização de Fasores Dinâmicos para Modelagem de Transitórios Eletromecânicos e Eletromagnéticos” XVII ERIAC, Ciudad del Este, Paraguay, Mayo 2017.
- [DANIEL 2017b] DANIEL, L.O., GOMES Jr, S., “Amortecimento de Modos Eletromecânicos Utilizando Estabilizadores Em Elos HVDC Considerando-se Diferentes Estratégias de Controle”,
- [DIRECTOR 1975] DIRECTOR, S.W., “Circuit Theory, A Computational Approach”, J. Wiley, New York, 1975.

- [DOMMEL 1969] DOMMEL, H.W., "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, No. 4, April 1969.
- [DOMMEL 1971] DOMMEL, H.W., "Nonlinear and Time-Varying Elements in Digital Simulation of Electromagnetic Transients," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-90, no. 6, pp. 2561-2567, Nov. 1971.
- [DOMMEL 1986] DOMMEL, H.W., "Electromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP Theory Book)", Prepared for Bonneville Power Administration, P. O. Box 3621, Portland, Oregon 97208, U.S.A., 1986.
- [DUFOUR 2011] DUFOUR, C., Mahseredjian, J., Bélanger, J., "A Combined State-Space Nodal Method for the Simulation of Power System Transients", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 2, April 2011, pages 928-935.
- [ERICKSON 1997] ERICKSON, R.W., "Fundamentals of Power Electronics", Chapman and Hall, New York, 1997.
- [FILIZADEH 2004] FILIZADEH, S., "Optimization-Enabled Electromagnetic Transient Simulation", Doctor of Philosophy Thesis, University of Manitoba, Winnipeg, Canada, 2004.
- [FRANCO 2006] FRANCO, N.B., "Cálculo Numérico", Editora Pearson, São Paulo, 2006.
- [FUCHS 1979] FUCHS, R.D., "Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas", LTC Editora S.A., Rio de Janeiro, 1979.
- [GAO 2003] GAO, W., Solodovnik, E. Dougal, R., Cokkinides, G., Meliopoulos, A.P.S., "Elimination of Numerical Oscillations in Power System Dynamic Simulation", Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Feb 2003. APEC '03, Miami Beach, FL, USA.
- [GOLE 1990] GOLE, A.M., Sood, V.K., "A Static Compensator Model for use with Electromagnetic Transients Simulation Programs", 1990, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, no. 3, pp 1398-1407, July.
- [GOMES 2002] GOMES Jr, S., "Modelagem e Métodos Numéricos para Análise Linear de Estabilidade Eletromecânica, Ressonância Subsíncrona, Transitórios Eletromagnéticos e Desempenho Harmônico de Sistemas de Potência", Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J, Brasil, 2002.

- [GOMES 2005a] GOMES Jr, S.; Martins, N.; Varricchio, S.L.; Portela, C.M.J, "Modal Analysis of Electromagnetic Transients in ac Networks Having Long Transmission Lines", IEEE Transactions on Power Delivery, USA, Vol. 20, No. 4, p. 2623-2630, October 2005.
- [GOMES 2005b] GOMES Jr, S.; Varricchio, S.L.; Martins, N.; Portela, C.; "Results on modal analysis to speed-up electromagnetic transient simulations", Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE, June 12-16, 2005 Pages:2744 – 2751.
- [GOMES 2006] GOMES Jr, S., Martins, N., Stankovic A., "Improved Controller Design Using New Dynamic Phasor Models of SVC's Suitable for High Frequency Analysis", Transmission and Distribution Conference and Exposition, Dallas, May 2006.
- [GOMES 2009a] GOMES Jr, S., Martins, N., Portela, C., "Sequential Computation of Transfer Function Dominant Poles of s-domain System Models", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 24, Issue 2, May 2009.
- [GOMES 2009b] GOMES Jr, S., Lirio F.L., "Ferramenta Computacional para Ajuste de Múltiplos FACTS (SVC e TCSC) Considerando Possíveis Interações Dinâmicas Adversas" XI SEPOPE, março 2009.
- [GOMES 2009c] S. GOMES Jr, S., Castro, A., PARREIRAS, T. J. M. A., "Integração entre o PacDyn e ANATEM para Estudos Dinâmicos de Sistema Elétricos", XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE, Recife, 2009.
- [GÓMEZ 2009] P. GÓMEZ, F. A. Uribe, "The numerical Laplace transform: an accurate tool for analyzing electromagnetic transients on power system devices", ELSEVIER Int. Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 31, Issues 2-3, Pages 116-123, February-March 2009.
- [GUBIAN 1991] GUBIAN, P., Zanella, M., "Stability Properties of Integration Methods in Spice Transient Analysis", Circuits and Systems, IEEE International Symposium on, June 1991.
- [GUEDES 2018] GUEDES, S.D., "Modelagem Tensorial de GCSC e Projeto de Controlador de Potência Ativa", Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J, Brasil, 2018.

- [GUO 2014] GUO, X., Lu, Z., Wang, B., Sun, X., Wang, L., Guerrero, J.M., "Dynamic Phasors-Based Modeling and Stability Analysis of Droop-Controlled Inverters for Microgrid Applications," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 6, pp. 2980-2987, Nov. 2014.
- [GUSTAVSEN 2009] GUSTAVSEN, B., Semlyen, A., "Admittance-Based Modeling of Transmission Lines by a Folded Line Equivalent", IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 24, NO. 1, January 2009.
- [HINGORANI 1988] HINGORANI, N.G., "High Power Electronics and flexible AC Transmission System," in IEEE Power Engineering Review, vol. 8, no. 7, pp. 3-4, July 1988.
- [HINGORANI 1999] HINGORANI, N.G., Gyugyi, L., "Understanding FACTS - Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems", 1 ed., New York, IEEE Press, 1999.
- [HONG 2009] HONG, S.N., Liu, C.R., Bo Z. Q., Klimek, A., "Elimination of numerical oscillation of dynamic phasor in HVDC system simulation," 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, AB, 2009, pp. 1-5.
- [JESUS 2003] JESUS, F.D., Soares, C.F.T., Neto, J.L.S., Watanabe, E.H., Aredes, M., Carvalho, J.R., Leal, M., 2003, "Improvement of a Positive- Sequence Components Detector in an Unbalanced Three-Phase System", VII Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, vol.1, pp. 640-645.
- [JUSAN 2010] JUSAN, F.C., Gomes Jr, S., Taranto, G.N., "SSR results obtained with a dynamic phasor model of SVC using modal analysis", Electrical Power and Energy Systems 32 (2010) 571–582.
- [KRON 1951] KRON, G., "Tensorial Analysis of Integrated Transmission Systems - Part I. The Six Basic Reference Frames", Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Volume: 70, Issue: 2, July 1951, Pages 1239 - 1248.
- [KRON 1952a] KRON, G., "Tensorial Analysis of Integrated Transmission Systems - Part II. Off-Nominal Turn Ratios", Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, Volume: 71, Issue: 1, Jan. 1952, Pages 505 - 512.

- [KRON 1952b] KRON, G., "Tensorial Analysis of Integrated Transmission Systems - Part III. The "Primitive" Division", Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, Volume: 71, Issue: 1, Jan. 1952, Pages 814 - 822.
- [KRON 1953] KRON, G., "Tensorial Analysis of Integrated Transmission Systems - Part IV. The Interconnection of Transmission Systems", Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, Volume: 72, Issue: 2, Jan. 1953, Pages 827 - 839.
- [KUFFEL 1997] KUFFEL, P., Kent, K., Irwin, G., "The implementation and effectiveness of linear interpolation within digital simulation", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 19, 1997, pages 221-227.
- [KUNDUR 1994] KUNDUR, P., "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc., USA, 1994.
- [KUNDUR 2003] KUNDUR, P., J. Paserba and S. Vitet, "Overview on definition and classification of power system stability," CIGRE/IEEE PES International Symposium Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, 2003.
- [LEC 1987] LEUVEN EMTP CENTER (LEC), "Alternative Transient Program Rule Book", 1987.
- [LIMA 1999] LIMA, L.T.G., "Aplicação de Sistemas Descritores na Análise de Transitórios em Redes Elétricas de Grande Porte". Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1999.
- [LIRIO 2007a] LIRIO, F.L., "Modelagem Tensorial de SVC e TCSC no Domínio s para Análise Linear de Transitórios Eletromagnéticos e Harmônicos", Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J, Brasil, 2007.
- [LIRIO 2007b] LIRIO, F.L. ; Gomes Jr, S. ; Watanabe, E.H. . "Coordinated Controller Desing of Multiples SVCs Using Detailed s-Domain Modeling" In: Proceeding of the IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, Florida (EUA), 2007.
- [MANITOBA 2016] MANITOBA HVDC Research Center, "PSCAD/EMTDC User's Manual", Canada., 2016.

- [MARTÍ 1982] MARTÍ, J. R., “Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transients Simulations”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 1, pp.147-155, 1982.
- [MARTÍ 1989] MARTÍ, J.R., Lin, J., “Suppression of Numerical Oscillations in the EMTP”, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 4, No.2, pp. 739-747, May 1989.
- [MARTÍ 1993] MARTÍ, J., Marti, L., Dommel, H.W., “Transmission Line Models for Steady-State and Transients Analysis”, 1993, 744-750.
- [MATTAVELLI 1997] MATTAVELLI, P., Verghese G. C., Stankovic A. M., “Phasor Dynamics of Thyristor-Controlled Series Capacitor Systems”, IEEE Transactions of Power Systems, vol. 12, no. 3, pp. 1259-1267, August 1997.
- [MOHAN 2003] MOHAN, N., Underland, T.M., Robbins, W.P., “Power Electronics, Converters, Applications and Design”, 3rd edition, Wiley, 2003.
- [MORCHED 1999] MORCHED, A., Gustavsen, B., Tartibi, M., “A Universal Model for Accurate Calculation of Electromagnetic Transients on Overhead Lines and Underground Cables”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999.
- [NOCEDAL 2006] NOCEDAL, J., Wright, S.J., “Numerical Optimization”, Springer, 2006.
- [NODA 2003] NODA, T., Semlyen, A., Iravani, R., “Reduced-Order Realization of a Nonlinear Power Network Using Companion-Form State Equations with Periodic Coefficients”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 18, NO. 4, OCTOBER 2003, pages 1478-1488.
- [OGATA 1990] OGATA, K., “Engenharia de Controle Moderno”, Tradução de I.J. Albuquerque, 2º edição, Editora Prentice Hall do Brasil Ltda., Rio de Janeiro, 1990.
- [OLIVEIRA 1983] OLIVEIRA, A.R.C., Cogo, J.R., “Modelos de Linhas de Transmissão na Análise de Sobretensões em Sistemas Elétricos de Potência”, Seminário de Pesquisa EFEI 1983, Itajubá, MG, Brasil, 1983.
- [PAICE 1996] PAICE, D.A., “Power Electronic Converter Harmonics - Multipulse Methods for Clean Power”. IEEE Press, 1996.

- [PILOTTO 1994] PILOTTO, L.A.S., “Modelagem Avançada de Sistemas CA/CC”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 1994.
- [PILOTTO 2000] PILOTTO, L.A.S., Alves, J.E.R., Watanabe, E.H., “High Frequency Eigenanalysis of HVDC and FACTS Assisted Power Systems”, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, WA, USA, July 2000, pages 823-829.
- [PORTELA 1970] PORTELA, C. M., “Análise de Redes Elétricas – Algumas Aplicações”, Edição subsidiada pelo Instituto de Alta Cultura, Lisboa, Portugal, 1970.
- [PORTELA 2002] PORTELA, C. , Tavares, M. C., “Modeling, simulation and optimization of transmission lines. Applicability and limitations of some used procedures”. IEEE T&D Latin America 2002, Brazil, 38p, 2002.
- [RASHID 2001] RASHID, M.H., “Power Electronics Handbook”, Academic Press, 2001.
- [ROLIM 2006] ROLIM, L.G.B.; Costa, D.R.; Aredes, M., 2006, “Analysis and Software Implementation of a Robust Synchronizing PLL Circuit Based on the pq Theory”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 53, p. 1919-1926.
- [RUGGIERO 1996] RUGGIERO, M.A.G., Lopes, V.L.R., “Cálculo Numérico – Aspectos Teóricos e Computacionais”, 2ª edição, Editora Pearson Makron Books, 1996.
- [SEMLYEN 1999] SEMLYEN, A., 1999, “s-Domain Methodology for Assessing the Small Signal Stability of Complex Systems in Non-Sinusoidal Steady State” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 6, no. 1, Feb, pp. 132-137.
- [SILVA 2016] SILVA, F.F., "Comparison of Bergeron and frequency-dependent cable models for the simulation of electromagnetic transients", 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Coimbra, 2016.
- [SOLODOVNIK 1998] E. V. SOLODOVNIK, G. J. Cokkinides and A. P. Sakis Meliopoulos, "On stability of implicit numerical methods in nonlinear dynamical systems simulation", Proceedings of Thirtieth Southeastern Symposium on System Theory, Morgantown, WV, 1998, pp. 27-31.
- [SOLOMON 2015] SOLOMON, J., “Numerical Algorithms: Methods for Computer Vision, Machine Learning, and Graphics”, CRC Press, 2015.

- [SOOD 2004] SOOD, V.K., "HVDC and FACTS Controllers - Applications of Static Converters in Power Systems", Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [SOUZA 2007] SOUZA, L.F.W., "Modelagem Analítica de um GCSC - Capacitor Série Controlado por Chave Autocomutada", Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J, Brasil, 2007.
- [STANKOVIC 2000] STANKOVIC, A.M., Mattavelli, P., Caliskan, V., Verghese G. C., "Modeling and Analysis of FACTS Devices with Dynamics Phasors", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, January 2000.
- [STARK 1979] STARK P., "Introdução aos Métodos Numéricos", Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 1979.
- [STOTT 1979] STOTT, B., "Power system dynamic response calculations", Proceedings of the IEEE, vol. 67, no. 2, pp. 219-241, Feb. 1979.
- [TANENBAUM 2002] TANENBAUM, A.S., Steen, M.V., "Distributed Systems: Principles and Paradigms", Prentice Hall, 2002.
- [TINNEY 1967a] TINNEY, W.F., Hart, C.E., "Power Flow Solution by Newton's Method", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Volume: PAS-86, Issue: 11, Nov. 1967, Pages 1449 - 1460.
- [TINNEY 1967b] TINNEY, W.F., Walker J.W., "Direct solutions of sparse network equations by optimally ordered triangular factorization," in Proceedings of the IEEE, vol. 55, no. 11, pp. 1801-1809, Nov. 1967.
- [VÁSQUEZ 2001] VÁSQUEZ, A.I.R., "Advanced Models for Electromagnetic Transient Simulation of Power Transmission Lines", Tesis de Doctorado en Ciencias Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV del IPN Unidad Guadalajara, Guadalajara, 2001.
- [WATANABE 2004] WATANABE, E.H., Souza, L.F.W., Jesus, F.D., Alves, J.E.R., Bianco, A., "GCSC - gate controlled series capacitor: a new FACTS device for series compensation of transmission lines", Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2004 IEEE/PES.
- [WATSON 2003] WATSON, N., Arrillaga, J., "Power Systems Electromagnetic Transients Simulation", 448p, The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2003.

- [ZANETTA 2003] ZANETTA JR, L.C., "Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência", Editora da Universidade de São Paulo - EDUSP. 1a Edição. São Paulo, 2003.
- [ZHOU 2014] ZHOU, Z., Dinavahi, V., "Parallel Massive-Thread Electromagnetic Transient Simulation on GPU", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no. 3, pp. 1045-1053, June 2014.

Apêndice A

Equações da Modelagem do TCR baseada em Fasores Dinâmicos

Nos trabalhos [PORTELA 1970] e [GOMES 2002] utilizou-se o conceito de tensores que relacionam grandezas no domínio da frequência. Idealmente, todas as fontes (gerações) do sistema de potência fornecem tensões senoidais puras e equilibradas. Contudo, os sistemas de potência modernos também são compostos por vários equipamentos com comportamento não-linear, os quais inevitavelmente provocam distorções nas formas de onda de tensões e correntes em regime permanente, devido às componentes harmônicas. Estas componentes variam no tempo quando ocorrem transitórios no sistema. O método tensorial consiste basicamente em decompor as grandezas em suas componentes reais e imaginárias, o que produz matrizes de ordem 2 (tensores) que relacionam tais componentes. Em [GOMES 2006] e [LÍRIO 2007] o método tensorial foi aplicado para a linearização de sistemas de potência que possuem elementos não lineares (como o SVC e o TCSC), produzindo um sistema linear matricial de equações compostas por inúmeros tensores. Nesta modelagem, os coeficientes da série de Fourier de funções do tempo (variáveis do problema) não-periódicas são chamados de fasores dinâmicos. O SVC é formado por um reator controlado por tiristores em paralelo com um capacitor fixo, conforme é mostrado na Figura A.1. O modelo de fasores dinâmicos para o SVC é mostrado a seguir.

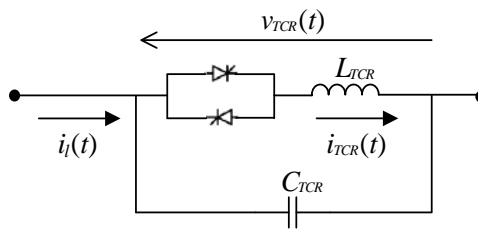


Figura A.1 – Reator controlado por tiristores em paralelo com capacitor.

$$C_{TCR} \frac{dv_{TCR}(t)}{dt} = i_l - i_{TCR}, \quad (A.1)$$

$$L_{TCR} \frac{di_{TCR}(t)}{dt} = q(\alpha(t), \theta_{PLL}(t), \sigma(t)) v_{TCR}(t), \quad (A.2)$$

onde q é uma função de chaveamento que pode assumir o valor 0 ou 1 dependendo do estado de condução dos tiristores a cada instante (Figura A.2), α é o ângulo de disparo dos tiristores, σ é o ângulo de condução e θ_{PLL} é o ângulo de referência (saída do PLL – *Phase Locked Loop*). A série de Fourier da função de chaveamento é a seguinte:

$$q(t) = q_0 + \sum_h q_h \cos[2h(\omega t - \beta)], \quad (A.3)$$

onde,

$$q_0 = \frac{\sigma}{\pi}; \quad q_h = \frac{2}{h\pi} \sin(h\sigma); \quad \beta = \alpha - \theta_{PLL} + \frac{\sigma}{2}. \quad (A.4)$$

O valor do ângulo de condução pode ser estimado (inicialização da simulação) utilizando:

$$\sigma = 2(\pi - \alpha), \quad (A.5)$$

e o valor de q (frequência fundamental) na inicialização da simulação é:

$$q = \frac{\sigma - \sin(\sigma)}{\pi}, \quad (A.6)$$

Os termos harmônicos são inversamente proporcionais ao quadrado do número de harmônicos h , o que faz com que as amplitudes sejam cada vez menores para os termos de frequência mais elevada.

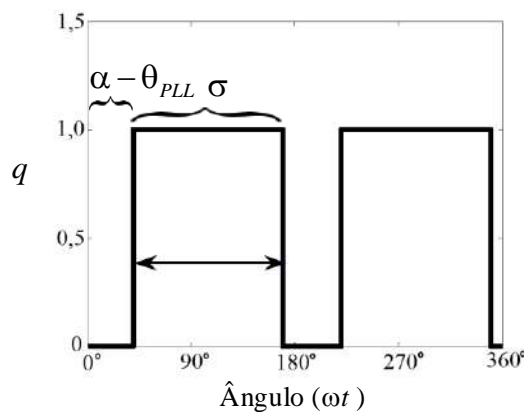


Figura A.2 – Função de chaveamento.

As equações em termos de fasores dinâmicos para o TCR são as seguintes:

$$\begin{aligned}
L_{TCR} \frac{dI_{TCRak\text{ Re}}}{dt} - k\omega L_{TCR} I_{TCRak\text{ Im}} &= \sum_{m+n=k} (\mathcal{Q}_{mkn1\text{ Re}} V_{TCRan\text{ Re}} - \mathcal{Q}_{mkn1\text{ Im}} V_{TCRan\text{ Im}}) \\
&+ \sum_{-m+n=k} (\mathcal{Q}_{mkn2\text{ Re}} V_{TCRan\text{ Re}} - \mathcal{Q}_{mkn2\text{ Im}} V_{TCRan\text{ Im}}) \\
&+ \sum_{m-n=k} (\mathcal{Q}_{mkn3\text{ Re}} V_{TCRan\text{ Re}} + \mathcal{Q}_{mkn3\text{ Im}} V_{TCRan\text{ Im}}),
\end{aligned} \tag{A.7}$$

$$\begin{aligned}
L_{TCR} \frac{dI_{TCRak\text{ Im}}}{dt} - k\omega L_{TCR} I_{TCRak\text{ Re}} &= \sum_{m+n=k} (\mathcal{Q}_{mkn1\text{ Im}} V_{TCRan\text{ Re}} + \mathcal{Q}_{mkn1\text{ Re}} V_{TCRan\text{ Im}}) \\
&+ \sum_{-m+n=k} (\mathcal{Q}_{mkn2\text{ Im}} V_{TCRan\text{ Re}} + \mathcal{Q}_{mkn2\text{ Re}} V_{TCRan\text{ Im}}) \\
&+ \sum_{m-n=k} (\mathcal{Q}_{mkn3\text{ Im}} V_{TCRan\text{ Re}} - \mathcal{Q}_{mkn3\text{ Re}} V_{TCRan\text{ Im}}),
\end{aligned} \tag{A.8}$$

onde,

$$\mathcal{Q}_{mkn1} = (1 - e^{jk120^\circ}) (1 - e^{-jn120^\circ}) \frac{\mathcal{Q}_m}{2}, \tag{A.9}$$

$$\mathcal{Q}_{mkn2} = (1 - e^{jk120^\circ}) (1 - e^{-jn120^\circ}) \frac{\mathcal{Q}_m^*}{2}, \tag{A.10}$$

$$\mathcal{Q}_{mkn3} = (1 - e^{jk120^\circ}) (1 - e^{jn120^\circ}) \frac{\mathcal{Q}_m}{2}, \tag{A.11}$$

$$\mathcal{Q}_0 = \frac{\sigma}{\pi}, \tag{A.12}$$

$$\mathcal{Q}_m = \frac{4}{\pi m} \text{sen}\left(\frac{m\sigma}{2}\right) e^{-jm\left(\alpha + \theta_{PLL} + \frac{\sigma}{2}\right)}. \tag{A.13}$$

As equações para o controle do SVC são mostradas a seguir. As equações (A.14), (A.15), (A.16), (A.17), (A.18), (A.19) e (A.20) são relativas ao controle de tensão do SVC mostrado na Figura A.3, as equações (A.22)(A.23) e (A.24) são relativas aos modelos de PLL mostrados na Figura A.4 e na Figura A.5.

$$V_{rms} = \frac{\sqrt{\sum_k (V_{TCRak\text{ Re}}^2 + V_{TCRak\text{ Im}}^2)}}{V_{base}}, \tag{A.14}$$

$$\dot{x}_V = \frac{1}{T} (-x_V + V_{rms}), \tag{A.15}$$

$$\dot{V}_{rmsf} = \frac{1}{T}(-V_{rmsf} + x_V), \quad (\text{A.16})$$

$$\dot{x}_B = K_{I-PI}(V_{ref} - V_{rmsf}), \quad (\text{A.17})$$

$$B_{TCR} = K_{P-PI}(V_{ref} - V_{rmsf}) + x_B, \quad (\text{A.18})$$

$$\bar{B}_n = \text{Limite}(-\omega L_{TCR} B_{TCR})_0^1, \quad (\text{A.19})$$

$$\bar{B}_n = 2 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{\pi}, \quad (\text{A.20})$$

$$B_{TCR} = -\frac{\bar{B}_n}{\omega_n L_{tcr}} \text{ (inicialização do TCR)} \quad (\text{A.21})$$

$$V_{TCRa1\text{Re}} \text{sen}\left(\theta_V - \frac{2\pi}{3}\right) - V_{TCRa1\text{Im}} \cos\left(\theta_V - \frac{2\pi}{3}\right) = 0, \quad (\text{A.22})$$

$$\dot{x}_{PLL} = K_{I-PLL}(\theta_V - \theta_{PLL}), \quad (\text{A.23})$$

$$\dot{\theta}_{PLL} = x_{PLL} + K_{P-PLL}(\theta_V - \theta_{PLL}), \quad (\text{A.24})$$

$$\int_{-\sigma_d}^0 \sum_h \left\{ \begin{aligned} &V_{TCRa1\text{Re}}(t + \theta/\omega) \cos[h(\theta + \alpha - \theta_{PLL} + \sigma)] \\ &- V_{TCRa1\text{Im}}(t + \theta/\omega) \text{sen}[h(\theta + \alpha - \theta_{PLL} + \sigma)] \end{aligned} \right\} d\theta = 0, \quad (\text{A.25})$$

$$\sigma = \sigma_d - \alpha(t) + \alpha(t - \sigma_d/\omega) + \theta_{PLL}(t) - \theta_{PLL}(t - \sigma_d/\omega), \quad (\text{A.26})$$

onde,

$$\tilde{V}_{TCRa1h} = (1 - e^{-j\theta_{\text{rot}}}) \tilde{V}_{TCRa1h}. \quad (\text{A.27})$$

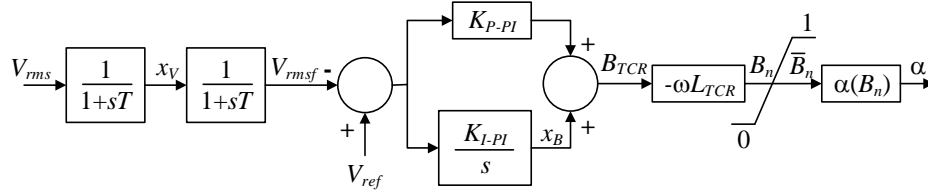


Figura A.3 – Malha de controle de tensão do SVC.

Na inicialização do SVC,

$$V_{ref} = V_{rms} = V_{rmsf} . \quad (A.28)$$

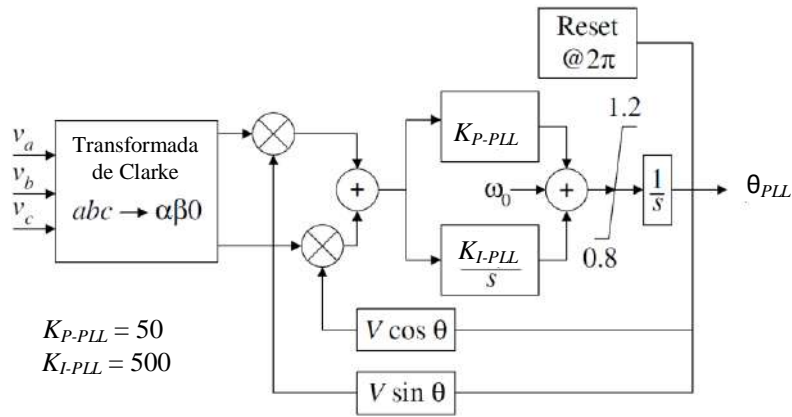


Figura A.4 – Malha do PLL.

Devido às características de passa-baixa do PLL [ROLIM 2006] um modelo simplificado pode ser utilizado com resultado semelhantes [GOLE 1990], [GOMES 2006].

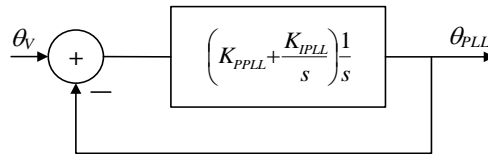


Figura A.5 – Modelo simplificado do PLL.

Este modelo consiste em um filtro com realimentação unitária apresentado na Figura A.5. Na inicialização do SVC:

$$\theta_{PLL} = \theta_v = \tan^{-1} \left(\frac{V_{tcr a1Im}}{V_{tcr a1Re}} \right) + \frac{2\pi}{3} . \quad (A.29)$$

Apêndice B

Sistemas Teste

Os sistemas-teste utilizados ao longo deste trabalho estão detalhados neste apêndice. O arquivo de dados do DPTS tem o seguinte formato descrito na Tabela B.1.

Tabela B.1 – Formato do arquivo de dados do DPTS.

DGERAIS (dados gerais)	
f	Frequência
sbase	Potência base (MVA)
fdescrip	Verificação de sistema descritor (0=não é descritor; 1=é descritor)
hmx	Máxima ordem harmônica de rede
np	Número de pulsos
DCTE (dados de constantes e tolerâncias)	
tolgauss	Tolerância do método de Gauss de inicialização
tolnewt	Tolerância do método de Newton de inicialização
tolvi	Tolerância de tensão na rede
maxiter	Número máximo de iterações
DBARRA_INF (dados de barras infinitas)	
Fr	Número da barra infinita
V	Módulo da tensão da barra (p.u. ou kV).
Ang	Ângulo da tensão da barra (graus)
DRLC (dados de ramo RLC série)	
Fr	Número da barra “DE” do ramo
To	Número da barra “PARA” do ramo
R	Resistência do ramo (Ω)
L	Indutância do ramo (H)
C	Capacitância do ramo (F)
Tipo	Tipo de ligação entre os componentes do ramo (1=paralelo; 2=série)
DLT (dados de LT com parâmetros distribuídos)	
Fr	Número da barra “DE” da LT
To	Número da barra “PARA” da LT
Ref	Barra de neutro (para aplicação de curto-circuito)
R	Resistência da LT (Ω /metro)
L	Indutância da LT (H/metro)
C	Capacitância da LT (F/metro)
Compr	Comprimento da LT (metros)
DTCR (dados de TCR)	
Nt	Número de identificação do TCR
Fr	Número da barra “DE” do TCR
To	Número da barra “PARA” do TCR
Eqp	Tipo de equipamento: (0=SVC, 1=TCSC)
R	Resistência do TCR (Ω)
L	Indutância do TCR (H)
C	Capacitância fixa em paralelo com o TCR (F)

Vbase	Tensão base fase-fase do TCR (kV)
Sig	Tipo de cálculo de sigma (0=pelo ângulo da corrente; 1=pela integração da tensão)
hmx	Máxima ordem harmônica do TCR
np	Número de pulsos
Lig	Tipo de ligação: (0=Delta, 1=Y)
g	Ângulo de inclinação das descontinuidades da função de chaveamento
DPLL (dados de PLL do TCR)	
Nt	Número do PLL
Kppll	Ganho proporcional do PLL
Kipll	Ganho integral do PLL
DCTCR (dados de controle do TCR)	
Nt	Número do controle
Tf1	Constante de tempo do filtro 1
Tft2	Constante de tempo do filtro 2
Kpcont	Ganho proporcional do controle
Kicont	Ganho integral do controle
Bmin	Susceptância mínima
Bmax	Susceptância máxima
tcont	Tipo de controle (0=alfa constante; 1=controle de tensão ligado)
Bc	Barra controlada
DITCR (dados de inicialização do TCR)	
Nt	Número da inicialização
tinic	Tipo de inicialização (0=alfa dado /1=Vref dado)
vinic	Valor de inicialização
DDIST (dados de distúrbio do TCR)	
Nt	Número do distúrbio
tdist	Tipo de distúrbio (0=degrau em alfa; 1=degrau em Vref; 2=degrau em Vfonte)
tstep	Tempo do distúrbio (segundos)
vstep	Valor do distúrbio
DCH (dados de chaves)	
Fr	Número da barra “DE” da chave
To	Número da barra “PARA” da chave
Tipo	Tipo de evento (1=abertura / 2=fechamento)
Tempo	Tempo de ocorrência do chaveamento (segundos)
Ron	Resistência da chave quando fechada (Ω)
Roff	Resistência da chave quando aberta (Ω)
DSIM (dados de simulação)	
Step	Passo de integração do método trapezoidal
Tmax	Tempo máximo de simulação (segundos)

Sistema Teste 1a:

Segue abaixo os detalhes do Sistema Teste 1, que foi utilizado ao longo do trabalho para simulações de validação do algoritmo DPTS no MATLAB considerando um modelo de linha de transmissão sem perdas. Na Figura B.1 é mostrado o diagrama deste sistema e na Tabela B.2 seu respectivo arquivo de dados.

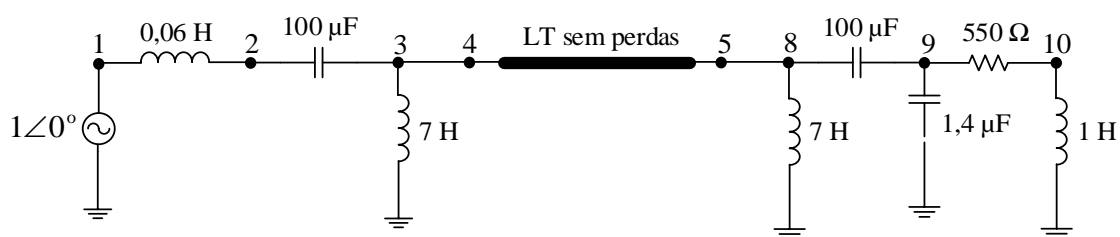


Figura B.1 – Diagrama do Sistema Teste 1a.

Tabela B.2 – Arquivo de dados do Sistema Teste 1a.

```

DGERAIS
(f)(sbase) (fdescrip) (hmx) (np)
60 100 0 1 2
DCTE
(tolgauss)(tolnewt)(tolvi)(maxiter)
1e-10 1e-10 1e-10 40
DBAR_INF
(fr) ( v ) ( Ang )
1 1. 0.
FIM
DRLC
(Fr) (To) ( R ) ( L ) ( C ) (Tipo)
1 2 0.0 0.06 0.0 2
2 3 0.0 0.0 100e-6 2
3 0 0.0 7.0 0.0 2
3 4 1e-6 0.0 0.0 2
5 8 1e-6 0.0 0.0 2
8 0 0.0 7.0 0.0 2
8 9 0.0 0.0 100e-6 2
9 0 0.0 0.0 1.4e-6 2
9 10 550.0 0.0 0.0 2
10 0 0.0 1.0 0.0 2
FIM
DLT
(Fr) (To) (Ref) ( R ) ( L ) ( C ) (Compr) (Pi)
4 5 0 0.0 0.862e-3 0.0138e-6 300 0
FIM
DSIM
( step ) (Tmax)
1e-6 40e-3
FIM

```


Sistema Teste 2a:

Segue abaixo os detalhes do Sistema Teste 2a, que foi utilizado ao longo do trabalho para simulações de validação do algoritmo DPTS no MATLAB considerando um modelo de linha de transmissão com perdas. Na Figura B.2 é mostrado o diagrama deste sistema e na Tabela B.3 seu respectivo arquivo de dados.

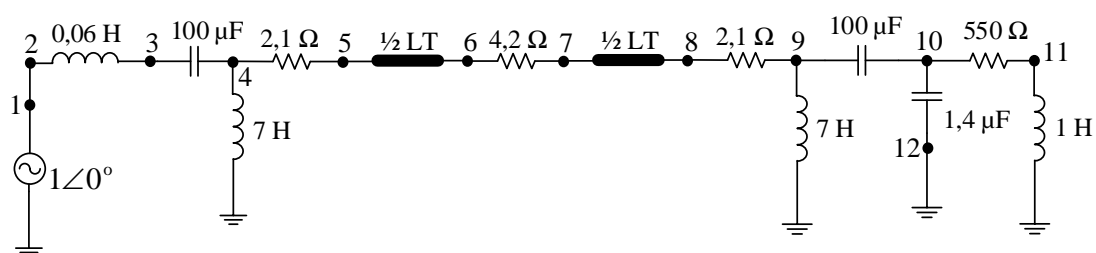


Figura B.2 - Diagrama do Sistema Teste 2a.

Tabela B.3 - Arquivo de dados do Sistema Teste 2a

DGERAIS						
(f)	(sbase)	(fdescrip)	(hmx)	(np)		
60	100	0	1	2		
DBAR_INF						
(fr)	(V)	(Ang)				
1	1.	0.				
FIM						
DRLC						
(Fr)	(To)	(R)	(L)	(C)	(Tipo)	
1	2	1e-5	0.0	0.0	2	
2	3	0.0	0.06	0.0	2	
3	4	0.0	0.0	100e-6	2	
4	0	0.0	7.0	0.0	2	
4	5	2.1	0.0	0.0	2	
6	7	4.2	0.0	0.0	2	
8	9	2.1	0.0	0.0	2	
9	0	0.0	7.0	0.0	2	
9	10	0.0	0.0	100e-6	2	
10	11	550	0.0	0.0	2	
11	0	0.0	1.0	0.0	2	
10	12	0.0	0.0	1.4e-6	2	
12	0	1e-5	0.0	0.0	2	
FIM						
DLT						
(Fr)	(To)	(Ref)	(R)	(L)	(C)	(Compr) (Pi)
5	6	0	0.0	0.862089e-3	0.013801e-6	150 0
7	8	0	0.0	0.862089e-3	0.013801e-6	150 0
FIM						
DSIM						
(step)	(Tmax)					
1e-6	200e-3					
FTM						

Sistema Teste 2b:

Sistema considerando um modelo de linha de transmissão com perdas. Na Figura B.3 é mostrado o diagrama deste sistema e na Tabela B.4 seu respectivo arquivo de dados.

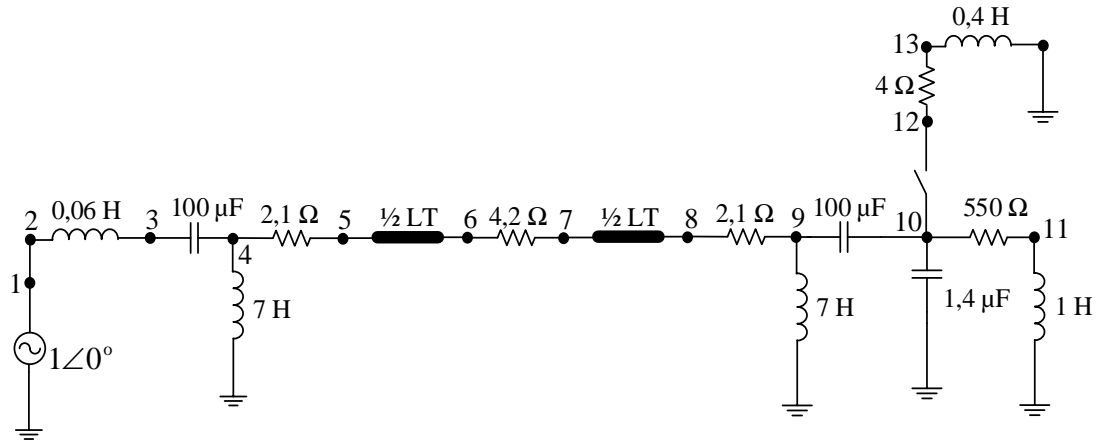


Figura B.3 - Diagrama do Sistema Teste 2b.

Tabela B.4 - Arquivo de dados do Sistema Teste 2b.

DGERAIS						
(f)	(sbase)	(fdescrip)	(hmx)	(np)		
60	100	0	1	2		
DBAR_INF						
(fr)	(v)	(Ang)				
1	1.	0.				
FIM						
DRLC						
(Fr)	(To)	(R)	(L)	(C)	(Tipo)	
1	2	1e-5	0.0	0.0	2	
2	3	0.0	0.06	0.0	2	
3	4	0.0	0.0	100e-6	2	
4	0	0.0	7.0	0.0	2	
4	5	2.1	0.0	0.0	2	
6	7	4.2	0.0	0.0	2	
8	9	2.1	0.0	0.0	2	
9	0	0.0	7.0	0.0	2	
9	10	0.0	0.0	100e-6	2	
10	11	550	0.0	0.0	2	
11	0	0.0	1.0	0.0	2	
10	0	0.0	0.0	1.4e-6	2	
10	12	1e+5	0.0	0.0	2	
12	13	4.0	0.0	0.0	2	
13	0	0.0	0.4	0.0	2	
FIM						
DLT						
(Fr)	(To)	(Ref)	(R)	(L)	(C)	(Compr) (Pi)
5	6	0	0.0	0.862089e-3	0.013801e-6	150 0
7	8	0	0.0	0.862089e-3	0.013801e-6	150 0
FIM						
DCH						
(Fr)	(To)	(Tipo)	(Tempo)	(Ron)	(Roff)	
10	12	2	150e-3	1e-5	1e+5	
FIM						
DSIM						
(step)	(Tmax)					
10e-6	500e-3					
FIM						

Sistema Teste 2c:

Sistema considerando um modelo de TL com perdas e um SVC conectado. Na Figura B.4 é mostrado o diagrama deste sistema e na Tabela B.5 seu respectivo arquivo de dados.

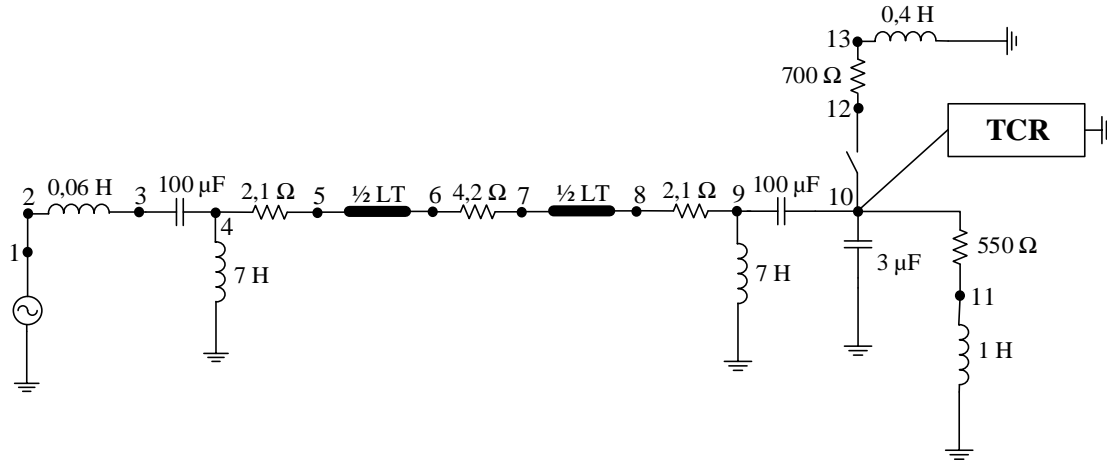


Figura B.4- Diagrama do Sistema Teste 2c.

Tabela B.5 - Arquivo de dados do Sistema Teste 2c.

```
DGERAIS
(f)(sbase) (fdescrip) (hmx) (np)
60      100      0      1      2
DCTE
(tolgauss)(tolnewt)(tolvi)(maxiter)
1e-10      1e-10      1e-10      40
DBAR_INF
(fr) ( v ) ( Ang )
1      500.      0.
FIM
DRLC
(Fr) (To) ( R ) ( L ) ( C ) (Tipo)
1      2      1e-5      0.0      0.0      2
2      3      0.0      0.06      0.0      2
3      4      0.0      0.0      100e-6      2
4      0      0.0      7.0      0.0      2
4      5      2.1      0.0      0.0      2
6      7      4.2      0.0      0.0      2
8      9      2.1      0.0      0.0      2
9      0      0.0      7.0      0.0      2
9      10      0.0      0.0      100e-6      2
10     11      550      0.0      0.0      2
11     0      0.0      1.0      0.0      2
10     12      1e+5      0.0      0.0      2
12     13      700      0.0      0.0      2
13     0      0.0      0.4      0.0      2
FIM
DLT
(Fr) (To) (Ref)( R ) ( L ) ( C ) (Compr) (Pi)
5      6      0      0.0      0.862089275e-3      0.013801157e-6      150      0
7      8      0      0.0      0.862089275e-3      0.013801157e-6      150      0
FIM
DTCR
(Nt)(Fr)(To)(Eqp)( R ) ( L ) ( C ) (vbase)(Sig)(hmx)(np)(Lig)(g)
1      10      0      0      0.0      5.0      1e-6      500      1      1      2      0      0
FIM
DPLL
(Nt) (kpp11) (kip11)
1      50      500
FIM
DCTCR
(Nt) (Tft1) (Tft2) (Kpcont) (Kicont) (Bmin) (Bmax)(tcont) (Bc)
```

```

      1  0.003  0.003  80.00  1000.  1e-5  1  1  10
(  1  0.003  0.003  1.00  1000.  1e-5  1  1  10
FIM
DITCR
(Nt) (tinic) (  vinic  )
  1      0      100.
FIM
DDIST
(Nt) (tdist) (tstep) (vstep)
  1      1  20e-3  0.001
FIM
DCH
(Fr) (To) ( Tipo ) ( Tempo ) ( Ron ) ( Roff )
( 10  12      2      .0200  1e-5  1e+5
FIM
DSIM
( step ) (Tmax)
 10e-6  200e-3
FIM

```

Sistema Teste 3a:

Sistema com indutor fixo no lugar do TCR para a realização de testes das rotinas e metodologia de solução. Na Figura B.5 é mostrado o diagrama deste sistema e na Tabela B.6 seu respectivo arquivo de dados.

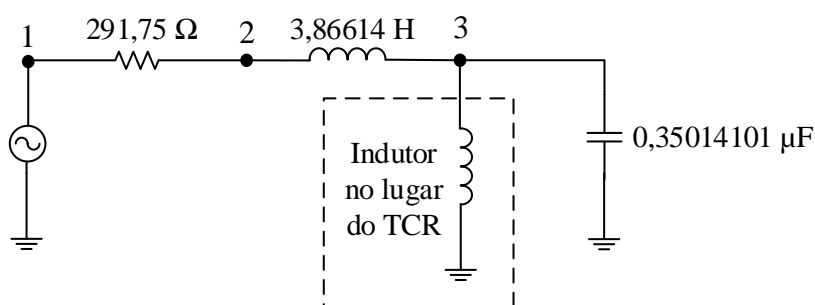


Figura B.5 - Diagrama do Sistema Teste 3a.

Tabela B.6 - Arquivo de dados do Sistema Teste 3a.

```

DGERAIS
(f)(sbase) (fdescrip) (hmx) (np)
60 100 0 1 2
DCTE
(tolgauss)(tolnewt)(tolvi)(maxiter)
1e-10 1e-10 1e-10 40
DBAR_INF
(fr) ( v ) ( Ang )
1 500. 0.
FIM
DRLC
(Fr) (To) ( R ) ( L ) ( C ) (Tipo)
1 2 291.75 0.0 0.0 2
2 3 0.0 3.86614 0.0 2
FIM
DTCR
(Nt)(Fr)(To)(Eqp)( R ) ( L ) ( C ) (vbase)(Sig)(hmx)(np)(Lig)(g)
1 3 0 0 0.0 36.1716 0.35014101e-6 500 1 1 2 0 0
FIM
DSIM
( step ) (Tmax)
50e-6 200e-3
FIM

```

Sistema Teste 3b:

Sistema com TCR para a realização de testes das rotinas e metodologia de solução. Na Figura B.6 é mostrado o diagrama deste sistema e na Tabela B.7 seu arquivo de dados.

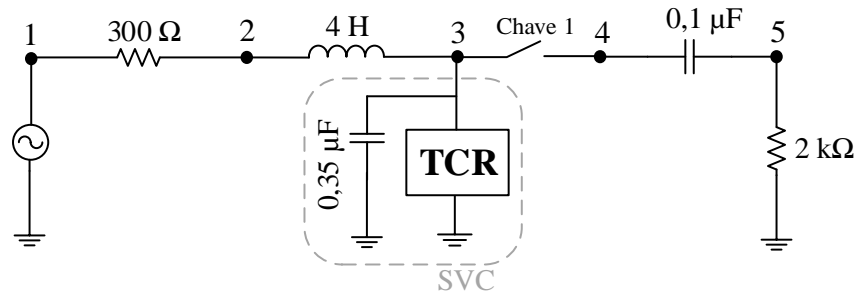


Figura B.6 - Diagrama do Sistema Teste 3b.

Tabela B.7 - Arquivo de dados do Sistema Teste 3b.

```

DGERAIS
(f)(sbase) (fdescrip) (hmx) (np)
60      100      0      1      2
DCTE
(tolgauss)(tolnewt)(tolvi)(maxiter)
1e-10      1e-10      1e-10      40
DBAR_INF
(fr) ( v ) ( Ang )
1      500.      0.
FIM
DRLC
(fr) (To) ( R ) ( L ) ( C ) (Tipo)
1      2      300      0.0      0.0      2
2      3      0.0      4.0      0.0      2
3      4      1e+5      0.0      0.0      2
4      5      0.0      0.0      0.1e-6      2
5      0      2000      0.0      0.0      2
FIM
DTCR
(Nt)(Fr)(To)(Eqp)( R ) ( L ) ( C ) (Vbase)(Sig)(hmx)(np)(Lig)(g)
1      3      0      0      0.0      36.0      0.35e-6      500      1      1      2      0      0
FIM
DPLL
(Nt) (kpp11) (kip11)
1      50      500
FIM
DCTCR
(Nt) (Tft1) (Tft2) (Kpcont) (Kicont) (Bmin) (Bmax)(tcont) (Bc)
1      0.003      0.003      0.01      200.      1e-5      1e+5      1      3
FIM
DITCR
(Nt) (tinic) ( vinic )
1      1      1.00
FIM
DDIST
(Nt) (tdist) (tstep) (vstep)
1      1      0.05      0.1
FIM
DCH
(fr) (To) (Tipo) (Tempo) ( Ron ) ( Roff )
3      4      2      100e-3      1e-5      1e+5
3      4      1      300e-3      1e-5      1e+5
FIM
DSIM
( step ) (Tmax)
100e-6      500e-3
FIM

```

Sistema Teste 3c:

Sistema com SVC para a realização de testes do DPTS com rede trifásica. Na Figura B.7 é mostrado o diagrama deste sistema e na Tabela B.8 seu respectivo arquivo de dados.

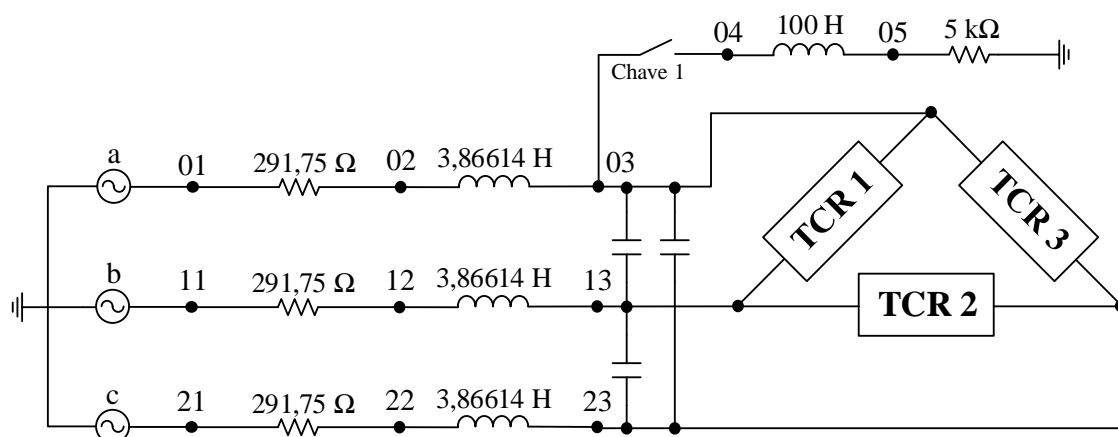


Figura B.7 - Diagrama do Sistema Teste 3c.

Tabela B.8 - Arquivo de dados do Sistema Teste 3c.

DGERAIS												
(f)	(sbase)	(fdescrip)	(hmx)	(np)								
60	100		0	1	2							
DCTE												
(tolgauss)	(tolnewt)	(tolvi)	(maxiter)									
1e-9	1e-9	1e-8	40									
DBAR_INF												
(fr)	(v)	(Ang)										
01	500.0	-90.										
11	500.0	-210.										
21	500.0	30.										
FIM												
DRLC												
(Fr)	(To)	(R)	(L)	(C)	(T)							
01	02	291.75	0.0	0.0	2							
02	03	0.0	3.86614	0.0	2							
11	12	291.75	0.0	0.0	2							
12	13	0.0	3.86614	0.0	2							
21	22	291.75	0.0	0.0	2							
22	23	0.0	3.86614	0.0	2							
03	04	1e+5	0.0	0.0	2							
04	05	0.0	100	0.0	2							
05	0	5000	0.0	0.0	2							
FIM												
DTCR												
(Nt)	(Fr)	(To)	(Eqp)	(R)	(L)	(C)	(vbase)	(Sig)	(hmx)	(np)	(Lig)	(g)
1	03	13	0	0.0	36.1716	0.11671367e-6	500	1	1	2	1	0
2	13	23	0	0.0	36.1716	0.11671367e-6	500	1	1	2	1	0
3	23	03	0	0.0	36.1716	0.11671367e-6	500	1	1	2	1	0
FIM												
DPLL												
(Nt)	(Kpp11)	(kip11)										
1	50	500										
2	50	500										
3	50	500										
FIM												
DCTCR												
(Nt)	(Tft1)	(Tft2)	(Kpcont)	(Kicont)	(Bmin)	(Bmax)	(tcont)	(Bc)				
1	0.003	0.003	0.0800000	92.5925926	0.1	1	1	03				

2	0.003	0.003	0.0800000	92.5925926	0.1	1	1	13
3	0.003	0.003	0.0800000	92.5925926	0.1	1	1	23
FIM								
DITCR								
(Nt)	(t _{inic})	(vinic)				
1	0			116.5				
2	0			116.5				
3	0			116.5				
FIM								
DDIST								
(Nt)	(tdist)	(tstep)	(vstep)					
1	1	0.01	-0.10					
2	1	0.01	-0.10					
3	1	0.01	-0.10					
FIM								
DCH								
(Fr)	(To)	(Tipo)	(Tempo)	(Ron)	(Roff)			
(03	04	2	10e-3	1e-5	1e+5			
FIM								
DSIM								
(step)	(Tmax)							
20e-6	200e-3							
FIM								

Sistema Teste 3d:

Sistema com SVC para a realização de testes do DPTS incluindo os harmônicos da rede. Na Figura B.8 é mostrado o diagrama deste sistema e na Tabela B.9 seu respectivo arquivo de dados.

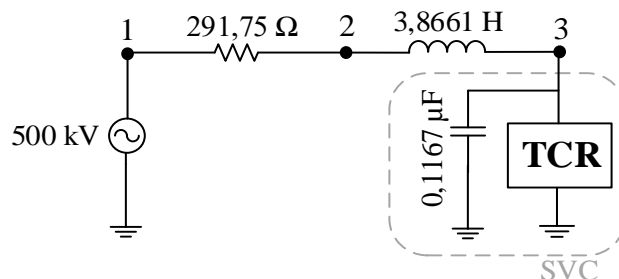


Figura B.8 - Diagrama do Sistema Teste 3d

Tabela B.9 - Arquivo de dados do Sistema Teste 3d.

```

DGERAIS
(f)(sbase) (fdescrip) (hmx) (np)
60 100 0 43 2
DCTE
(tolgauss)(tolnewt)(tolvi)(maxiter)
1e-10 1e-10 1e-10 40
DBAR_INF
(fr) ( v ) ( Ang )
1 500.0 -90.
FIM
DRLC
(Fr) (To) ( R ) ( L ) ( C ) (Tipo)
1 2 291.75 0.0 0.0 2
2 3 0.0 3.86614 0.0 2
FIM
DTCR
(Nt)(Fr)(To)(Eqp)( R ) ( L ) ( C ) (Vbase)(Sig)(hmx)(np)(Lig)(g)
1 3 0 0 0.0 36.1716 0.11671367e-6 500 1 43 2 0 0
FIM
DPLL
(Nt) (kpp11) (kip11)
1 50 500
FIM
DCTCR
(Nt) (Tft1) (Tft2) (Kpcont) (Kicont) (Bmin) (Bmax)(tcont) (Bc)
( 1 0.003 0.003 0.05 100. 1e-5 1 1 0
1 0.003 0.003 0.25 500. 0.1 1 1 0
FIM
DITCR
(Nt) (tinic) ( vinic )
1 1 1.05
FIM
DDIST
(Nt) (tdist) (tstep) (vstep)
( 1 1 0.01 -0.01
1 1 0.01 -0.05
FIM
DSIM
( step ) (Tmax)
50e-6 100e-3
FIM

```

Sistema Teste 4a:

Sistema de 20 barras com 2 SVCs para simular caso com múltiplos SVCs. Na Figura B.9 é mostrado o diagrama deste sistema, na Tabela B.10 os valores do ponto de operação inicial (fluxo de potência) e Tabela B.11 o arquivo de dados de entrada do DPTS. As demais informações do sistema são:

- Os elementos *shunt* estão representados com Mvar referente à tensão de 1 pu;
- MVA dos trafos: T_{G1} : 2500, T_{G2} : 700, T_{G3} : 300, $T_{6-17}=T_{12-18}$: 1500, $T_{S1}=T_{S2}$: 120;
- Reatância de dispersão dos trafos: 0,08 pu na base de potência do transformador;
- Níveis de Tensão: barras 1-12: 500 kV, barras 13-18: 230 kV, barras 19-20: 13.8 kV;
- LTs de 230 kV: $r=0,050 \Omega/\text{km}$, $x=0,488 \Omega/\text{km}$, $b=3,371 \mu\text{S}/\text{km}$;
- LTs de 500 kV: $r=0,022 \Omega/\text{km}$, $x=0,325 \Omega/\text{km}$, $b=5,200 \mu\text{S}/\text{km}$;
- SVC1: 20 a 120 Mvar para $V=1$ pu, *Slope* 4%, $K_p=0,5$, $K_i=2500$, $T_f=0,003$, $T_{f2}=0,005$;
- SVC2: 40 a 110 Mvar para $V=1$ pu, *Slope* 1%, $K_p=2,0$, $K_i=3000$, $T_f=0,003$, $T_{f2}=0,005$;

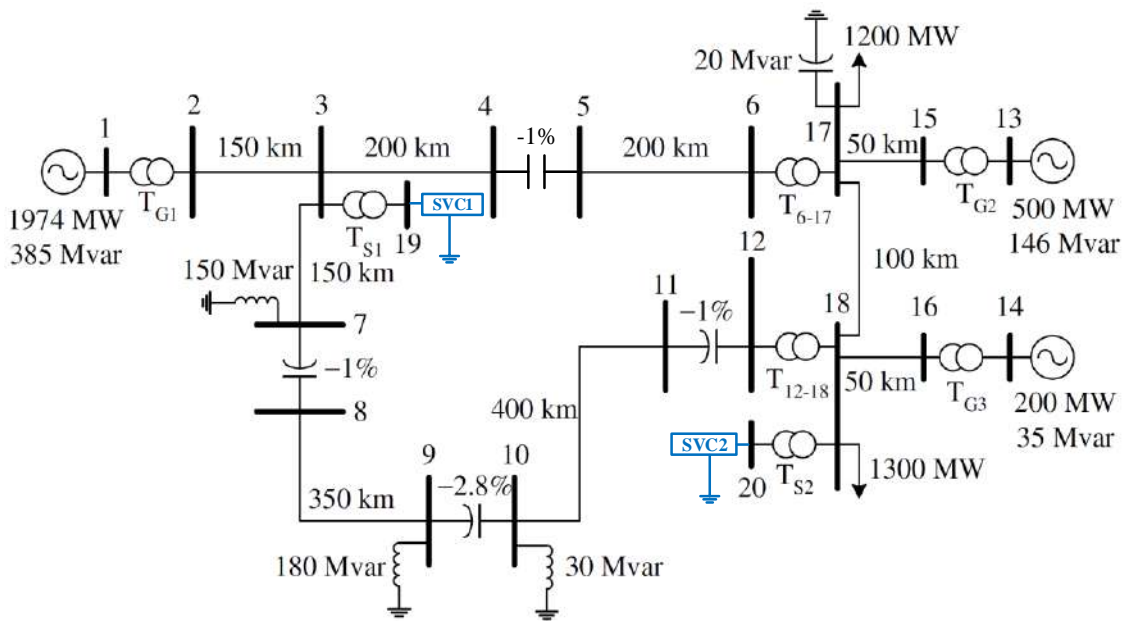


Figura B.9 - Diagrama do Sistema Teste 4a.

Tabela B.10 – Ponto de operação (fluxo de potência) do Sistema Teste 4a.

nb	V(pu)	θ (graus)	P(MW)	Q(Mvar)
1	1.0100	0.00	1973.6	385.1
2	0.9998	-3.59		
3	0.9808	-26.26		
4	0.9917	-41.18		
5	0.9859	-35.56		
6	0.9710	-50.34		
7	1.0025	-37.09		
8	0.9753	-31.60		
9	1.0376	-55.56		
10	0.9746	-41.01		
11	0.9952	-68.47		
12	0.9937	-63.37		
13	1.0400	-37.29	500.0	145.7
14	1.0200	-57.94	200.0	35.3
15	1.0255	-40.36		
16	1.0121	-60.91		
17	0.9727	-53.39	-1200.0	
18	0.9935	-66.09	-1300.0	
19	1.0128	-26.26		48.7
20	1.0369	-66.09		67.5

Tabela B.11 - Arquivo de dados do Sistema Teste 4a.

```

DGERAIS
(f)(sbase) (fdescrip) (hmx) (np)
60 100 0 1 2
DCTE
(tolgauss)(tolnewt)(tolvi)(maxiter)
1e-9 1e-9 1e-7 40
DBAR_INF
(fr) ( v ) ( Ang )
1 505 -90.
13 520 -127.2878742496778
14 510 -147.9448741394076
301 500 0.
FIM
DRLC
(Fr) (To) ( R ) ( L ) ( C ) (Tipo)
(trafos dos geradores
1 2 0.0 21.220659e-3 0.0 2
13 15 0.0 75.788068e-3 0.0 2
14 16 0.0 176.838826e-3 0.0 2
(trafos entre linhas
6 17 0.0 35.367765e-3 0.0 2
12 18 0.0 35.367765e-3 0.0 2
(trafos dos SVCs
3 19 0.0 442.097064e-3 0.0 2
18 20 0.0 442.097064e-3 0.0 2
(resistencias das LTs Bergeron com perdas
2 101 0.825 0.0 0.0 2
102 103 1.650 0.0 0.0 2
104 3 0.825 0.0 0.0 2
(
3 105 1.100 0.0 0.0 2
106 107 2.200 0.0 0.0 2
108 4 1.100 0.0 0.0 2
(
5 109 1.100 0.0 0.0 2
110 111 2.200 0.0 0.0 2
112 6 1.100 0.0 0.0 2
(

```

17	113	2.9536862	0.0	0.0	2
114	115	5.9073724	0.0	0.0	2
116	15	2.9536862	0.0	0.0	2
(
17	117	5.9073724	0.0	0.0	2
118	119	11.8147448	0.0	0.0	2
120	18	5.9073724	0.0	0.0	2
(
3	121	0.825	0.0	0.0	2
122	123	1.650	0.0	0.0	2
124	7	0.825	0.0	0.0	2
(
8	125	1.925	0.0	0.0	2
126	127	3.850	0.0	0.0	2
128	9	1.925	0.0	0.0	2
(
10	129	2.200	0.0	0.0	2
130	131	4.400	0.0	0.0	2
132	11	2.200	0.0	0.0	2
(
18	133	2.9536862	0.0	0.0	2
134	135	5.9073724	0.0	0.0	2
136	16	2.9536862	0.0	0.0	2
(indutores shunt					
7	0	0.0	4.42097	0.0	2
9	0	0.0	3.68414	0.0	2
10	0	0.0	22.10485	0.0	2
(capacitores serie fixos					
7	8	0.0	0.0	106.1033e-6	2
9	10	0.0	0.0	37.8940e-6	2
11	12	0.0	0.0	106.1033e-6	2
4	5	0.0	0.0	106.1033e-6	2
(capacitores shunt					
17	0	0.0	0.0	0.212207292e-6	2
(cargas resistivas					
17	0	197.1167769	0.0	0.0	2
18	0	189.8139887	0.0	0.0	2
(chaves					
10	202	1e+5	0.0	0.0	2
202	203	0.0	0.4	0.0	2
203	0	1100	0.0	0.0	2
FIM					
DLT					
(Fr)	(To)	(Ref)	(R)	(L)	(C) (Compr) (Pi)
101	102	0	0.0	0.862089275e-3	0.013793478e-6 75 0
103	104	0	0.0	0.862089275e-3	0.013793478e-6 75 0
(
105	106	0	0.0	0.862089275e-3	0.013793478e-6 100 0
107	108	0	0.0	0.862089275e-3	0.013793478e-6 100 0
(
109	110	0	0.0	0.862089275e-3	0.013793478e-6 100 0
111	112	0	0.0	0.862089275e-3	0.013793478e-6 100 0
(
113	114	0	0.0	6.117486785e-3	0.001892097e-6 25 0
115	116	0	0.0	6.117486785e-3	0.001892097e-6 25 0
(
117	118	0	0.0	6.117486785e-3	0.001892097e-6 50 0
119	120	0	0.0	6.117486785e-3	0.001892097e-6 50 0
(
121	122	0	0.0	0.862089275e-3	0.013793478e-6 75 0
123	124	0	0.0	0.862089275e-3	0.013793478e-6 75 0
(
125	126	0	0.0	0.862089275e-3	0.013793478e-6 175 0
127	128	0	0.0	0.862089275e-3	0.013793478e-6 175 0
(
129	130	0	0.0	0.862089275e-3	0.013793478e-6 200 0
131	132	0	0.0	0.862089275e-3	0.013793478e-6 200 0
(
133	134	0	0.0	6.117486785e-3	0.001892097e-6 25 0
135	136	0	0.0	6.117486785e-3	0.001892097e-6 25 0
FIM					
DTCR					
(Nt)	(Fr)	(To)	(Eqp)	(R)	(L) (C) (vbase) (Sig) (hmx) (np) (Lig) (g)
1	19	0	0	0.0	19.893405 0.42441458e-6 500 1 1 2 0 0

2	20	0	0	0.0	28.421025	0.38904607e-6	500	1	1	2	0	0
FIM												
DPLL												
(Nt)	(Kpp11)	(kip11)										
1	50	500										
2	50	500										
FIM												
DCTCR												
(Nt)	(Tft1)	(Tft2)	(Kpcont)	(Kicont)	(Bmin)	(Bmax)	(tcont)	(Bc)				
1	0.003	0.003	0.5	1250.	0.1	1	1	19				
2	0.003	0.003	2.0	750.	0.1	1	1	20				
FIM												
DITCR												
(Nt)	(tinic)	(vinic)										
1	1	1.0128										
2	1	1.0369										
FIM												
DDIST												
(Nt)	(tdist)	(tstep)	(vstep)									
1	1	0.4	0.02									
2	1	0.3	-0.02									
FIM												
DCH												
(Fr)	(To)	(Tipo)	(Tempo)	(Ron)	(Roff)							
10	202	2	50e-3	1e-5	1e+5							
FIM												
DSIM												
(step)	(Tmax)											
20e-6	600e-3											
FIM												

Sistema Teste 5a:

Sistema considerando três modelos de TL com perdas e três SVCs. Na Figura B.10 é mostrado o diagrama deste sistema e na Tabela B.12 seu respectivo arquivo de dados.

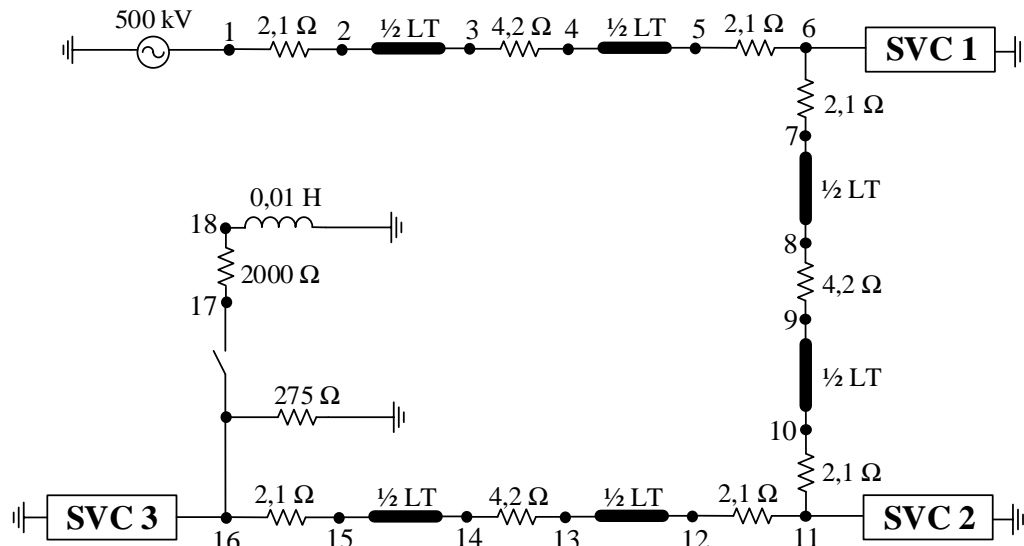


Figura B.10- Diagrama do Sistema Teste 5a.

Tabela B.12 - Arquivo de dados do Sistema Teste 5a.

```

DGERAIS
(f)(sbase) (fdescrip) (hmax) (np)
60 100 0 1 2
DCTE
(tolgauss)(tolnewt)(tolvi)(maxiter)
1e-10 1e-10 1e-6 40
DBAR_INF
(fr) ( V ) ( Ang )
1 500 0.
FIM
DRLC
(Fr) (To) ( R ) ( L ) ( C ) (Tipo)
1 2 2.1 0.0 0.0 2
3 4 4.2 0.0 0.0 2
5 6 2.1 0.0 0.0 2
6 7 2.1 0.0 0.0 2
8 9 4.2 0.0 0.0 2
10 11 2.1 0.0 0.0 2
11 12 2.1 0.0 0.0 2
13 14 4.2 0.0 0.0 2
15 16 2.1 0.0 0.0 2
16 0 275.0 0.0 0.0 2
16 17 1e+5 0.0 0.0 2
17 18 3000.0 0.0 0.0 2
18 0 0.0 0.01 0.0 2
FIM
DLT
(Fr) (To) (Ref) ( R ) ( L ) ( C ) (Compr) (Pi)
2 3 0 0.0 0.862089275e-3 0.013801157e-6 150 0
4 5 0 0.0 0.862089275e-3 0.013801157e-6 150 0
7 8 0 0.0 0.862089275e-3 0.013801157e-6 150 0
9 10 0 0.0 0.862089275e-3 0.013801157e-6 150 0
12 13 0 0.0 0.862089275e-3 0.013801157e-6 150 0
14 15 0 0.0 0.862089275e-3 0.013801157e-6 150 0
FIM
DTCR
(Nt)(Fr)(To)(Eqp)( R ) ( L ) ( C ) (Vbase)(Sig)(hmx)(np)(Lig)(g)
1 6 0 0 0.0 5.0 1e-6 500 1 1 2 0 0
2 11 0 0 0.0 5.0 1e-6 500 1 1 2 0 0

```

3	16	0	0	0.0	5.0	1e-6	500	1	1	2	0	0
FIM												
DPLL												
(Nt)	(kpp11)	(kip11)										
1	50	500										
2	50	500										
3	50	500										
FIM												
DCTCR												
(Nt)	(Tft1)	(Tft2)	(Kpcont)	(Kicont)	(Bmin)	(Bmax)	(tcont)	(Bc)				
1	0.003	0.003	0.05	1000.	1e-5	1	1	6				
2	0.003	0.003	1.80	833.3333	1e-5	1	1	11				
3	0.003	0.003	0.05	250.	1e-5	1	1	16				
FIM												
DITCR												
(Nt)	(tinic)	(vinic)								
1	0		103.25									
2	1		1.0257									
3	1		1.0085									
FIM												
DCH												
(Fr)	(To)	(Tipo)	(Tempo)	(Ron)	(Roff)							
16	17	2	50e-3	1e-5	1e+5							
FIM												
DSIM												
(step)	(Tmax)											
20e-6	500e-3											
FIM												